

ARQUEOLOGIA MOLECULAR

EL COBE Y LA NUEVA COSMOLOGIA

WERNER K. HEISENBERG

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

NEBULOSAS PLANETARIAS

JULIO 1992
600 PTAS.



Julio de 1992 Número 190

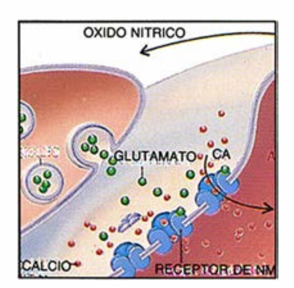
4



La pandemia del SIDA
Roy M. Anderson y Robert M. May

Para luchar contra el SIDA no hay, por ahora, arma más eficaz que el cambio en los hábitos de la relación sexual. Los modelos matemáticos que desenredan la compleja trabazón entre la biología de la infección individual y la transmisión a otros llegan a resultados, contrarios a la intuición, que deberían considerarse en los programas de sanidad pública.

12



Funciones biológicas del óxido nítrico
Solomon H. Snyder y David S. Bredt

Una de las moléculas reguladoras más polifacéticas del organismo no es la proteína compleja de turno, sino una molécula muy tóxica y de vida efímera. El óxido nítrico transmite mensajes, dilata los vasos sanguíneos y auxilia a los leucocitos en su función inmunitaria. Hubo que esperar a los últimos años para ir descubriendo sus complejas funciones fisiológicas.

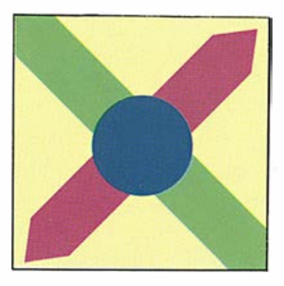
22



Nebulosas planetarias
Noam Soker

En 1785, William Herschel llamó así a ciertas nubes brillantes que semejaban planetas fantasmales. La astronomía sabe ya que las nebulosas planetarias constituyen los últimos vertidos al espacio de materia procedente de una estrella moribunda y encierran los secretos que pueden aclararnos el destino final del universo.

44



CIENCIA EN IMAGENES

Puntos ciegos
Vilayanur S. Ramachandran

Todos hemos jugado a hacer desaparecer un punto marcado en un papel, llevándolo hasta el punto ciego del ojo. El autor se vale aquí del punto ciego para explorar la capacidad perceptiva del cerebro.

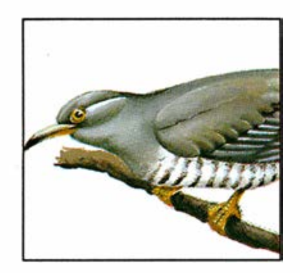
52



Optica binaria
Wilfrid B. Veldkamp y Thomas J. McHugh

La óptica avanzada que posibilitó la grabación de finísimos circuitos en semiconductores precipitó la llegada de la revolución microelectrónica. Las mismas técnicas fotolitográficas están ahora transformando la óptica, donde se adivinan sistemas de visión artificial que imitan al ojo y procesadores ópticos integrados para comunicaciones.

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

60 

Simpatría y coevolución entre el críalo y sus hospedadores
Manuel Soler

La evolución del parasitismo de cría actúa como si se tratara de una carrera de armamentos. Frente a las adaptaciones de los parásitos, las especies hospedadoras desarrollan medidas de contra-adaptación. Es la pugna etológica que vienen librando el críalo y la urraca.

66 

Heisenberg, imprecisión y revolución cuántica
David C. Cassidy

A la edad de 25 años, Werner Karl Heisenberg formuló la teoría que lleva su nombre y le convirtió en figura señera del siglo XX. En su cátedra se formó una brillante generación de físicos que se dispersaron por todo el mundo tras la victoria nacionalsocialista.

74 

TENDENCIAS DE LA ARQUEOLOGÍA MOLECULAR

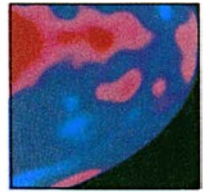
Restos que hablan
Philip E. Ross

La arqueología está cambiando su utillaje. Pasan a segundo plano las paletas y escobillas tradicionales y emergen las técnicas de la biología molecular, necesarias para el análisis de los restos de ácidos nucleicos y de proteínas que se conservan en huesos y momias. Se espera, de ese hilo, sacar el ovillo de las migraciones.

SECCIONES

3 **Hace...**

32 **Perfiles**

34 

Ciencia y sociedad

Revolución cosmológica.

42 **De cerca**

84 **Ciencia y empresa**

90 **Taller y laboratorio**

94 

Juegos matemáticos

La olimpiada interplanetaria.

98 **Libros**

104 **Apuntes**

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Esther Aznar Muñoz: *La pandemia del SIDA*; Esteban Santiago: *Funciones biológicas del óxido nítrico*; Ramón Pascual: *Nebulosas planetarias*; Luis Bou: *Puntos ciegos*; Amando García: *Optica binaria*; Manuel García Doncel: *Heisenberg, imprecisión y revolución cuántica*; José M. García de la Mora: *Restos que hablan;* J. Vilardell: *Hace...* y *Taller y laboratorio*; Angel Garcimartín: *Perfiles*; Shigeko Suzuki: *De cerca*; Luis Bou: *Juegos matemáticos*

Ciencia y sociedad:

M. Puigcerver, V. Cabrera y F. Bernaldo de Quirós, Celia Marrasé, Ana Mª García y Juan P. Adrados

Ciencia y empresa:

Manuel Puigcerver y Pascual Capilla

Libros:

E. Rodríguez Ocaña, J. González León, Joandomènec Ros y Luis Alonso

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
5	Mike Goldwater, Matrix
6-7	Laurie Grace
8	Antonio Aragón
9-10	Majid Fotuhi, Universidad Johns Hopkins
13	Majid Fotuhi
14-15	Tomo Narashima
16	Tomo Narashima (*arriba*), Johnny Johnson (*abajo*)
17	S. H. Snyder y David S. Bdredt
18	Johnny Johnson
19	Tomo Narashima
23	Bruce Balick, Universidad de Washington
24	George Retseck
25	George Retseck (*arriba*), Philip Plait, Univ. de Virginia (*abajo*)
26	J. Johnson (*arriba*), David F. Malin, Observatorio Anglo-Australiano (*abajo*)
27	David F. Malin
28-29	George Retseck
44-49	Johnny Johnson
53	Wilfrid B. Veldkamp
54	Paul Wallich
55	Jarid Schneidman
56	Wilfrid B. Veldkamp (*arriba*), Laurie Grace (*abajo*)
57	Wilfrid B. Veldkamp
61	M. Teresa Ortiz y Expogràfic, S. A.
62	Juan Soler Cruz
63	E. Poyatos (*arriba*), M. Teresa Ortiz (*abajo*)
64	Expogràfic, S. A.
67	Archivos W. Heisenberg, Inst. de Física Max Planck, Munich
68	Archivos W. Heisenberg, Inst. de Física Max Planck (*a-c*); Archivo Bettmann (*d*): Inst. Americano de Física, Niels Bohr Photo Library (*e*); Archivo Niels Bohr, Copenhague (*f*); AIP, Niels Bohr Photo Library (*g*); Archivos de W. Heisenberg (*h*)
70	Pauli Letter Collection del CERN
71	Ian Worpole
72	Archivos Werner Heisenberg
74-75	Cortesía del Instituto Oriental, Universidad de Chicago
76	Stephan Thomas/Black Star
77	Gary Bogdon/Picture Group
78	David Levenson/Black Star
79	Robert Prochnow
80-81	Paul Hanny/Gamma-Liaison; Sygma (*abajo, izda. y dcha.*)
82	Erik Trinkaus, cortesía de Pictures of Record, Inc.
83	Edward Bell
90-91	Gabor Kiss
92	Ian Worpole



LA PORTADA representa una versión idealizada de Hélice, brillante nebulosa planetaria situada a 500 años luz de la Tierra. La nebulosa consiste en un globo de gas en expansión, cuyo diámetro actual es de cinco años luz, que se formó cuando una estrella moribunda expulsó sus capas exteriores (véase "Nebulosas planetarias", por Noam Soker, en este mismo número). La radiación ultravioleta del caliente remanente estelar del centro hace que el gas resplandezca. (Ilustración de la portada de George Retseck y David Malin.)

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
DIRECTOR EDITORIAL José María Valderas Gallardo
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal Garfella
PRODUCCIÓN César Redondo Zayas
M.ª Cruz Iglesias Capón
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Viladomat, 291 6º 1ª - 08029 Barcelona (ESPAÑA)
Teléfonos 321 81 91 - 321 83 48 Telefax 419 47 82

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR Jonathan Piel
BOARD OF EDITORS Alan Hall, *Executive Editor*; Michelle Press, *Managing Editor*; Timothy M. Beardsley; Elizabeth Corcoran; Deborah Erickson; Marguerite Holloway; John Horgan, *Senior Writer*; Philip Morrison, *Book Editor*; Corey S. Powell; John Rennie; Philip E. Ross; Ricki L. Rusting; Russell Ruthen; Gary Stix; Paul Wallich; Philip M. Yam.
PUBLISHER John J. Moeling, Jr.
ADVERTISING DIRECTOR Robert F. Gregory
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Claus-Gerhard Firchow
CHAIRMAN OF THE BOARD Dr. Pierre Gerckens
CHAIRMAN EMERITUS Gerard Piel

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Viladomat, 291 6º 1ª
08029 Barcelona (España)
Teléfonos 321 81 91 - 321 83 48
Fax 419 47 82

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	6.600	12.000
Extranjero	7.300	13.400

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 600 pesetas
Extraordinario: 775 pesetas

—Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.

— En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.

— El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. 662 10 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Viladomat, 291 6º 1ª - 08029 Barcelona
Teléfonos 321 81 91 - 321 83 48

PUBLICIDAD

Gustavo Martínez Ovín
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. 409 70 45
Fax 409 70 46

OJD Difusión Publicidad

ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 - 76

Fotocomposición: Tecfa. Línea Fotocomposición, S. A. Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona
Fotocromos reproducidos por Scan V2, S. A., Pje. Jansana, 8 Bajos - 08902 l'Hospitalet (Barcelona)
Imprime Rotographik, S. A. Ctra. de Caldes, km 3,7 - Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Hace...

... cincuenta años

«Tal como recordarán los lectores de edad media o más avanzada, los niños mimados de la primera guerra mundial fueron los químicos. En la segunda edición del conflicto, ese papel ha pasado a manos de los físicos, exaltados hasta las alturas de una especie de nobleza bélica. En una búsqueda sistemática de los más capaces para trabajar en esta rama de la ciencia, el personal dedicado a la física ha sido rastrillado una y otra vez; pero ahora el país va a ser sometido a un rastrillado mucho más fino para localizar físicos de menor nivel hasta la categoría de licenciados de instituto e incluso más baja. Se ha pedido a los directores y profesores de institutos y colegios que seleccionen a los jóvenes con aptitudes innatas para la física y su útil de trabajo, las matemáticas, y fomenten sus intereses hacia esas vías.»

«Existe siempre una carga eléctrica negativa distribuida por la superficie terrestre y una carga eléctrica positiva en las zonas más externas de la atmósfera. Ambos conjuntos de cargas producen en el seno del aire un campo eléctrico dirigido verticalmente hacia abajo. Con buen tiempo, el campo es de unos 100 volts por metro. La conductividad del aire es baja y la presencia del campo eléctrico produce una corriente de fuga que tiende a descargar la carga negativa de la tierra. Esta, de no ser por la acción de algún agente restituyente, se descargaría por completo en cinco o seis minutos. Corresponde al relampagueo devolver la carga a la tierra y mantenerla en un estado de carga normal.»

... cien años

«El profesor Loeffler, creador del sistema de destrucción de ratones de campo por infección con bacilos del tifus, ha regresado a Alemania procedente de Grecia, donde sometió su sistema a una prueba práctica. Informa el profesor que su misión ha sido un éxito completo y que en un plazo de ocho o nueve días las plagas de múridos que infestaban las zonas del país por él visitadas, y que destruían las cosechas, quedaron totalmente aniquiladas. A los campesinos se les solicitaba que se reunieran en un punto dado provistos de cestas de pan desmenuzado. Este se remojaba entonces en la solución que contenía los bacilos y se devolvía a los propietarios con instrucciones para esparcirlo por los campos. Para demostrar la inocuidad del pan así saturado de bacilos, el doctor Loeffler y sus ayudantes lo comían.»

«En una reciente reunión de la Academia de Ciencias, de París, el doctor Brown-Sequard despertó el interés con su trabajo acerca de su sistema de tratamiento con inyecciones de solución de esperma. La alocución del sabio estuvo salpicada de pruebas de eficacia. Como ejemplo citó a un paciente de 80 años, residente en la isla Mauricio, que recuperó la salud y el vigor desde un estado de parálisis y atonía. Otro caso fue el de un hombre joven postrado en cama, a quien se daba por moribundo, y que en una quincena se restableció lo suficiente para realizar fuertes ejercicios a caballo, y ahora, añadió jocosamente el doctor, “su salud mejora con tal rapidez que la familia ha prohibido al médico que prosiga el tratamiento”. El doctor Brown-Sequard declara que las 20.000 inyecciones administradas por él en los últimos tres años han tenido éxito todas invariablemente.»



Silla de Wellington

«Mr. McKendrick, amigo del profesor Dewar, había ensayado el efecto de temperaturas bajas sobre las esporas de organismos microbianos, exponiendo sangre y leche putrefactas y sustancias similares a una temperatura de –182 ºC durante una hora; tras este plazo, las sustancias siguieron pudriéndose. Hizo lo mismo con semillas, que aguantaron un frío del mismo orden. Por todo ello concluyó que sus experimentos habían probado la validez de la idea expuesta por Lord Kelvin hace algunos años, según la cual el primer vestigio de vida pudo haber sido traído a la Tierra por un meteorito portador de semillas.»

«Un kilogramo de carbón que se emplee en generar vapor destinado a una máquina refrigeradora de buen rendimiento puede producir un efecto de enfriamiento real igual al producido por la fusión de 16 a 46 kilogramos de hielo. Estas cifras bastan para demostrar la viabilidad de la refrigeración artificial para edificios de oficinas, hospitales, teatros, hoteles e incluso domicilios privados de gran calidad. Es un ejemplo curioso de lo que tardan en llegar al gran público los beneficios de la inventiva moderna el hecho de que, en plena canícula, haya millares de personas que suden sentadas en oficinas recalentadas; la actividad comercial se retarda y el rendimiento de los trabajadores se resiente bastante. Al mismo tiempo, apenas a dos o tres manzanas de distancia, pueden encontrarse enormes almacenes de víveres que se mantienen a temperaturas de congelación durante todo el año. Si resulta económicamente interesante preservar patos y pavos muertos en Greenwich Street, ¿por qué no ha de serlo cuidar del confort térmico de los oficinistas de Broadway?»

«En la silla que se muestra en la ilustración, el ocupante se supone que ha de sentarse cruzado, cual si ocupara una silla de montar. Un adminículo así para bibliotecas o estudios, que permitiera los habituales cambios de postura que solemos buscar por comodidad, no puede dejar en muchos casos de contribuir a nuestro confort. La figura es una representación muy aproximada de la silla que durante muchos años usó el duque de Wellington en el Castillo de Walmer, Inglaterra.»

La pandemia del SIDA

Los modelos matemáticos nos ayudan a descubrir el camino que sigue el virus del SIDA en su infección de individuos y poblaciones. Esos constructos producen resultados que contradicen la intuición

Roy M. Anderson y Robert M. May

A pesar de 10 años de investigación intensa y de esfuerzos tenaces para desarrollar una terapia eficaz, continúa sin domeñarse la propagación del virus causante del SIDA por buena parte del mundo. Mientras se confía en que se materialice la promesa de una intervención médica y clínica, el empeño por conocer la epidemia y hacerle frente con cambios de las pautas de conducta se está reforzando con el advenimiento de nuevas herramientas: los modelos matemáticos, que abarcan, en su consideración, el proceso entero de transmisión del virus en el rango de población.

En Africa subsahariana, y de forma creciente en la India y el sureste asiático, la celeridad con que el virus de la inmunodeficiencia humana (VIH) se propaga nos pinta un cuadro alarmante: la infección alcanza niveles altísimos entre las prostitutas y sus clientes masculinos, así como entre los adictos a drogas intravenosas. Pero la tasa de infección crece también de manera persistente en la población general.

Algunos países del mundo desarrollado muestran signos alentadores de deceleración en el ritmo de propagación de la epidemia entre varones homosexuales, debido en parte a los cambios de pautas de conducta. Pero la difusión prosigue entre los adictos a drogas intravenosas, y asistimos a una inquietante tendencia de crecimiento lento, pero firme, entre la población heterosexual. El aumento entre heterosexuales de Norteamérica y Europa occidental se halla, por ahora, circunscrito a los barrios pobres de las ciudades. Muchos observadores creen que esta tendencia refleja un estadio precoz de una epidemia mucho más expandida.

El optimismo que se tenía ante un pronto desarrollo de vacunas se ha apagado. Los problemas éticos y prácticos que rodean los ensayos en humanos de fármacos potenciales y la necesidad de un gran número de primates para las pruebas han refrenado las esperanzas iniciales. Sin vacuna, no queda otro camino para poner coto a la propagación de la infección que apostar por la educación de los individuos. El público debe conocer la manera en que se transmite el virus y saber también qué cambios en sus hábitos sexuales podrían alejar el peligro de una infección.

Los modelos matemáticos se nos ofrecen como auxiliares únicos para facilitar esos conocimientos. En epidemiología, igual que en cualquier otra ciencia, las matemáticas aportan un método para pensar con rigor sobre algunas cuestiones complicadas. En la epidemiología en particular, esos modelos nos dicen qué debe ser mesurado y nos permiten interpretar las pautas observadas. Y lo que reviste mayor interés: nos ayudan a desenredar las complejas relaciones entre la biología de la infección en los individuos y la transmisión de la infección en las comunidades.

Los modelos matemáticos cartografían un desarrollo lento e incesante de la epidemia del SIDA a lo largo de muchas décadas. Porque nos revelan un cuadro en que el número de infecciones por VIH (y por tanto de SIDA) aumenta a ritmo creciente con el transcurso del tiempo, a la manera del interés compuesto, los modelos desempeñan un papel crucial para convencer a los gobiernos e instituciones internacionales de lo aconsejable que resulta ponerse ya manos a la obra.

Casi con toda seguridad, el virus del SIDA procede de Africa. Las homologías de las cepas humanas con los virus descubiertos en primates salvajes de las regiones subsaharianas respaldan dicho origen. En los centros urbanos más castigados de Africa, del 20 al 30 por ciento de las mujeres embarazadas están infectadas por el VIH. En numerosas ocasiones se ha atribuido ese alto nivel de infección a las condiciones socioeconómicas.

Pero nos parece más probable que tal porcentaje sea consecuencia del largo tiempo en que el virus estuvo diseminándose por la región; lo que ocurre es, sencillamente, que la epidemia se encuentra en una fase más avanzada. Los análisis de las secuencias moleculares del agente señalan que el virus humano pudo haber estado expandiéndose, de forma lenta y en ciertas partes de Africa, desde hace 100 o 200 años, si no más. Pudo suceder que, en esas fechas remotas, los comienzos complejos de la epidemia (brotes aislados en áreas rurales) pasaran inadvertidos por no destacar sobre el intenso ruido de fondo de infección y enfermedad. O cabe también que las formas ancestrales del VIH en humanos no provocaran el SIDA.

La epidemia se expandió con rapidez, a comienzos de los ochenta, entre drogadictos intravenosos y varones homosexuales de los Estados Unidos y Europa occidental. Este avance obedeció, sin duda, a la introducción del virus en el seno de comunidades que guardaban unas pautas de conducta ideales para la propagación del agente: la inyección de droga y la promiscuidad sexual, con cambios frecuentes de pareja.

ROY M. ANDERSON y ROBERT M. MAY trabajan conjuntamente en la evolución y desarrollo de las enfermedades infecciosas en animales y humanos. Anderson enseña biología en el Colegio Imperial de Londres, donde también da clases May. Este cursó la carrera de físicas en la Universidad de Sidney; tras ocupar una cátedra en ese departamento, se pasó a la docencia de la zoología en Princeton a comienzos de los setenta. Buena parte de la investigación en equipo de ambos ha quedado reflejada en el libro *Infectious Diseases: Dynamics and Control*, de aparición reciente.

Por lo que respecta a Africa subsahariana, no es fácil pergeñar una interpretación de lo que allí está aconteciendo. El rápido crecimiento que está experimentando la enfermedad refleja probablemente la evolución normal de una epidemia. Suponiendo un crecimiento exponencial, de duplicación cada tres años por ejemplo, se tardaría unos 30 años para que la infección subiera de una milésima por ciento a un nivel detectable del 1 %, pero sólo tres años más para saltar del 10 al 20 por ciento. El tiempo de duplicación podría haber sido mucho más lento en los primeros años de la infección. Todo parece indicar la contribución de los factores sociales y económicos en la aceleración del avance (y en el acortamiento del tiempo de multiplicación); así, citaremos los movimientos de población provocados por las guerras y la búsqueda de trabajo lejos del hogar, que facilitan el contacto frecuente con prostitutas a causa de la separación de sus esposas y novias.

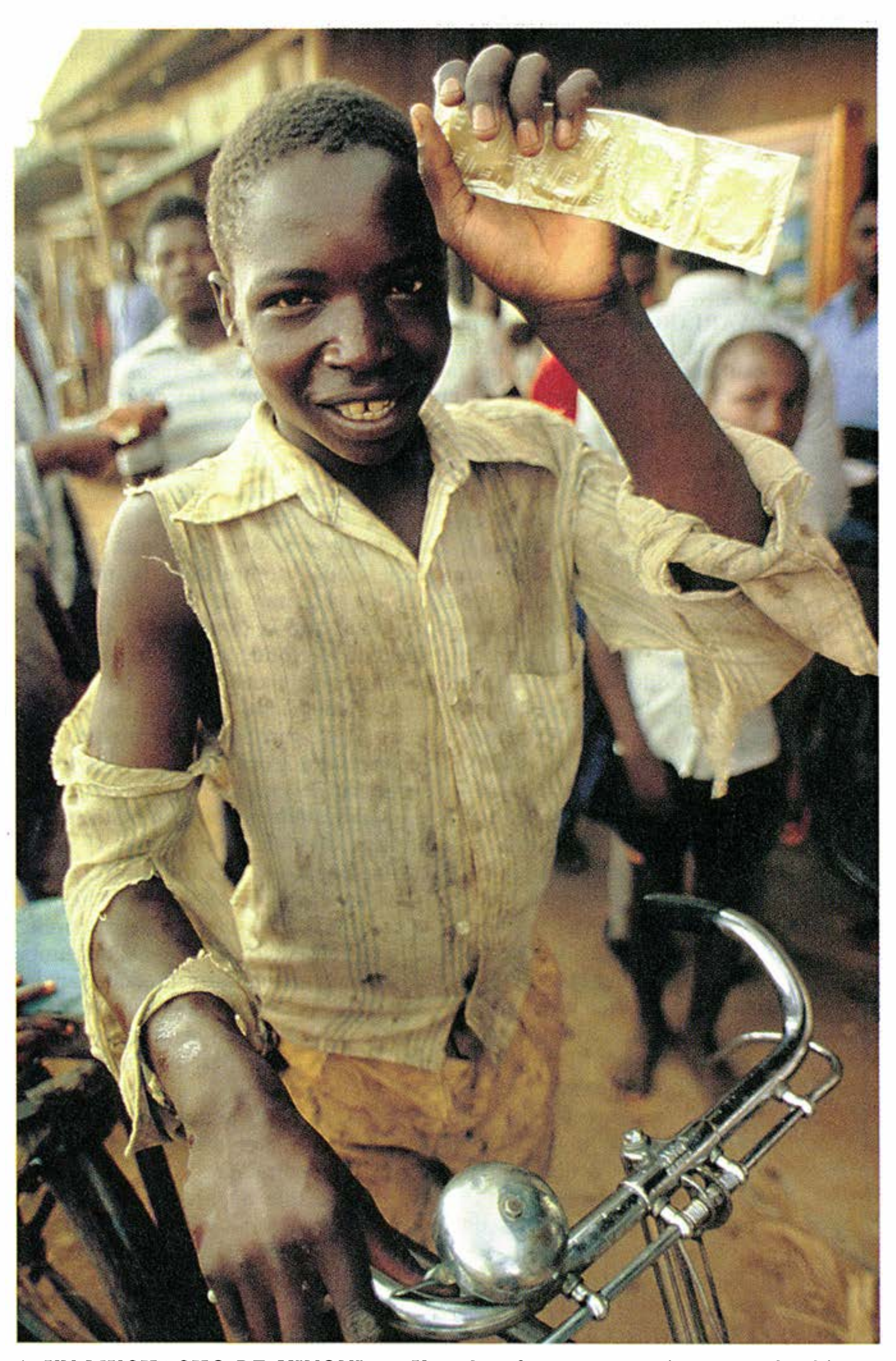
Cualesquiera que sean las causas de variación en el tiempo de diseminación en los distintos lugares, comienza a ganar aceptación la tesis de que, amén de afectar a grupos minoritarios, el VIH constituye también una grave amenaza para la mayoría de los adultos que han adquirido la madurez sexual y para los pequeños nacidos de madres infectadas. Los casos de SIDA registrados a lo largo del primer decenio "visible" de la epidemia (los años ochenta) representan sólo una pequeña fracción de los que pueden computarse en los noventa.

Las cifras de totales registrados en las estadísticas pueden desplazar pronto la mayoría que ahora corresponde al mundo occidental hacia el mundo en desarrollo. Considerado el largo período de incubación del SIDA, un promedio de 10 años en la población adulta, los informes sobre incidencia del síndrome reflejan probablemente sólo un 10 por ciento del número real de personas infectadas (las cifras oficiales hablan 350.000 casos, pero se estima que superan el millón). Por otra parte, y sin salirnos de esa fase precoz de la pandemia global, los datos denuncian que el SIDA se habría convertido en la causa principal de muerte entre la población adulta y en determinante primero de mortalidad infantil en algunas ciudades de Africa.

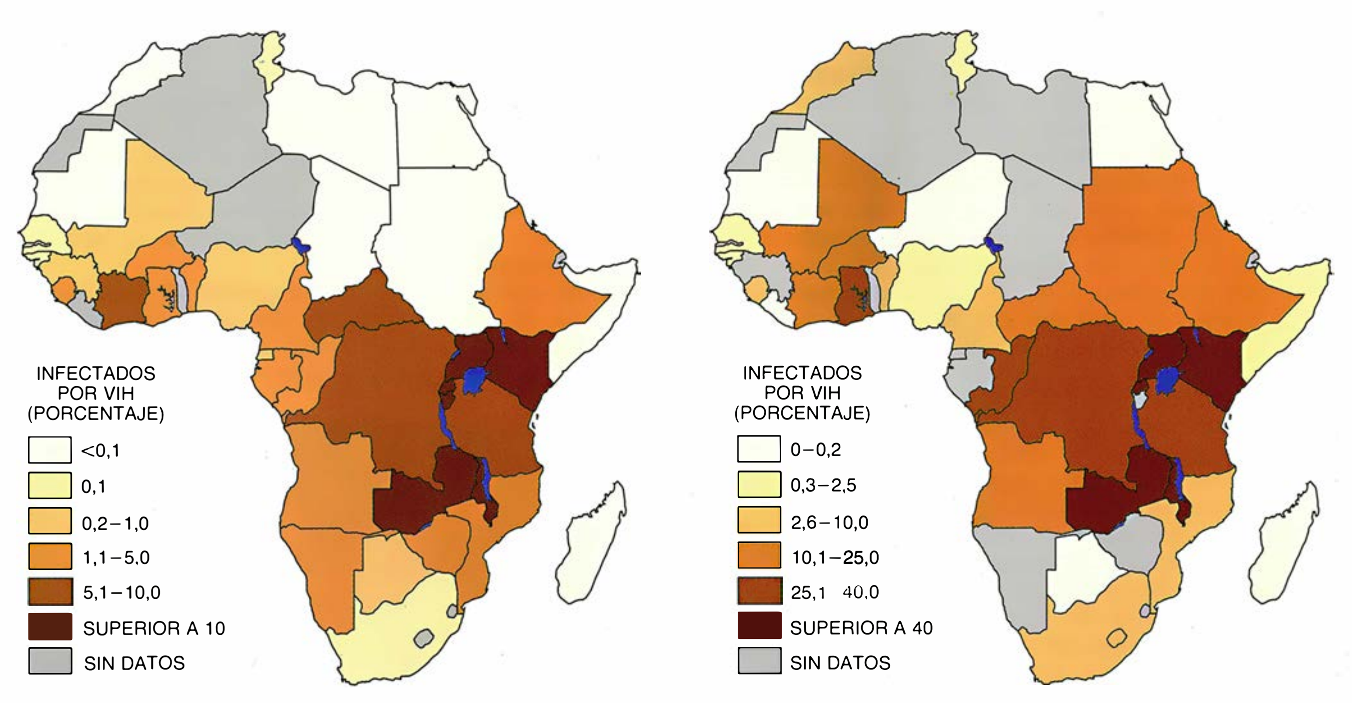
La gravedad potencial de la pandemia empeora, si cabe, por culpa de la plasticidad del genoma del VIH. Se ha encontrado una gran diversidad genética en aislados víricos obtenidos secuencialmente del mismo paciente o de diferentes pacientes. La diversidad es tal que las partículas aisladas deberían considerarse poblaciones con genomas emparentados, lo que suele llamarse cuasiespecies. La historia nos enseña cuán difícil resulta crear vacunas protectoras contra organismos que mutan rápidamente y que presentan, ante el sistema inmunitario, antígenos en permanente cambio.

Tiempo atrás, se atribuía el aumento de la diversidad vírica durante el período de incubación a la destrucción paulatina del sistema inmunitario: a medida que se va resquebrajando éste, van sobreviviendo más tipos de virus en el cuerpo. Pero, ¿es la pluralidad de antígenos consecuencia de la destrucción del sistema inmunitario o constituye acaso su causa? A tenor de la investigación reciente, fundada en modelos sencillos, habría que decantarse quizá por la hipótesis causal.

Durante el período de incubación, se detectan elevados niveles de partículas víricas en sangre por un corto período, que oscila de semanas a



1. UN MUCHACHO DE KINONI, en Uganda, ofrece preservativos, que el gobierno regala dentro de su política contra la propagación del SIDA. El programa gubernamental se dirige, sobre todo, a los varones que han emigrado en solitario a las ciudades en busca de trabajo y cambian de pareja sexual frecuentemente.



2. AMPLIA VARIABILIDAD de la propagación de la infección por el virus de la inmunodeficiencia humana entre heterosexuales del continente africano. Aunque la pauta geográfica de predominio en la población general es muy similar a la que presentan los grupos de alto riesgo, éstos poseen más altos los niveles de infección. Los datos, de la Oficina del Censo de los Estados Unidos, cubre de 1985 a 1990; los niveles actuales de infección son indudablemente más elevados.

meses, subsiguiente a la infección. Al poco de ese máximo inicial en la concentración de virus, se observan ya los anticuerpos en la circulación. Pero resulta luego difícil aislar el virus, sin embargo, durante un largo período asintomático, variable, entre la primoinfección y la manifestación del SIDA. El período de incubación se caracteriza por bajos niveles de replicación vírica y por un descenso, constante o lento, de células CD4+, una clase de leucocitos, que cumplen una misión importante en la defensa del sistema inmunitario contra el VIH. Algunos pacientes presentan repuntes menores en el nivel de virus por cortos períodos durante el curso de la incubación. Conforme van asentándose los síntomas de la enfermedad, aumenta la posibilidad de aislar el virus, cuya concentración en los sidosos suele ser elevada. Transcurridos 10 años desde el momento de la infección, un 50 por ciento de los varones homosexuales han contraído la enfermedad; después de establecido el diagnóstico, la esperanza de vida se cifra en uno o en un par de años, si no se recurre a la farmacoterapia con zidovudina (AZT).

La figura 5 ilustra el curso seguido en el caso de dos varones homosexuales de Amsterdam. Ambos pacientes partían de una baja diversidad antigénica que fue creciendo poco a poco durante el período asintomático. Uno contrajo el SIDA, y en él se percibe que la diversidad vírica aumentó antes del comienzo del síndrome, para declinar después. Esta caída, contraria a la intuición, era de esperar de acuerdo con lo predicho por la teoría. A lo largo del dilatado período de incubación, crece el número de cepas de VIH. El sistema inmunitario lo controla todavía todo. Por consiguiente, a medida que se amplía la gama de cepas, los representantes de cada una de ellas se dan en aproximadamente el mismo número. Esa diversidad creciente se manifiesta, por tanto, en muestras restringidas de suero o células. Ahora bien, en la fase de SIDA, cuando se multiplica la concentración vírica y se derrumba el sistema inmunitario, predominan las cepas de VIH con alta tasa de replicación y protienden a ser las únicas que aparezcan en las muestras.

Cierto modelo matemático del proceso produce cambios temporales en la concentración y en la diversidad vírica que se ajustan a las tendencias observadas. El modelo predice que la diversidad posee un umbral crítico por debajo del cual el sistema inmunitario puede suprimir la abundancia vírica y por encima del cual se torna incapaz de regular la multiplicación vírica. En otras palabras, el modelo sugiere que el desarrollo de una inmunodeficiencia grave en los pacientes infectados por el VIH es una consecuencia de la capacidad del virus para producir continuamente variantes y matar células CD4+. La diversidad antigénica es la causa, no el efecto, de la inmunodeficiencia.

El modelo sirve también para calibrar el impacto de la terapia con zidovudina. El tratamiento frena el ritmo de progresión del SIDA; por lo que concierne al momento de su prescripción en el arco del largo período de incubación del SIDA, se revela que la administración precoz del fármaco prolonga significativamente el intervalo previo a la aparición de la inmunodeficiencia severa.

Los modelos matemáticos están contribuyendo a aclarar la dinámica del fenómeno de transmisión del VIH en el seno de una sociedad y de una comunidad a otra. La posibilidad de propagarse depende de la magnitud de la tasa de reproducción de la infección. Esta tasa, llamada R_0, define el promedio de casos secundarios de infección generados por un caso primario en una población donde casi todos se hallan expuestos a la infección —como en las fases tempranas de la epidemia. Si R_0 es mayor que uno, cada infección produce más de un "descendiente", y el resultado no es otro que la reacción en cadena, la epidemia. Si R_0 es menor que 1, la infección no puede automantenerse. A mayor valor de

R_0, menor el tiempo invertido en doblarse el número de casos.

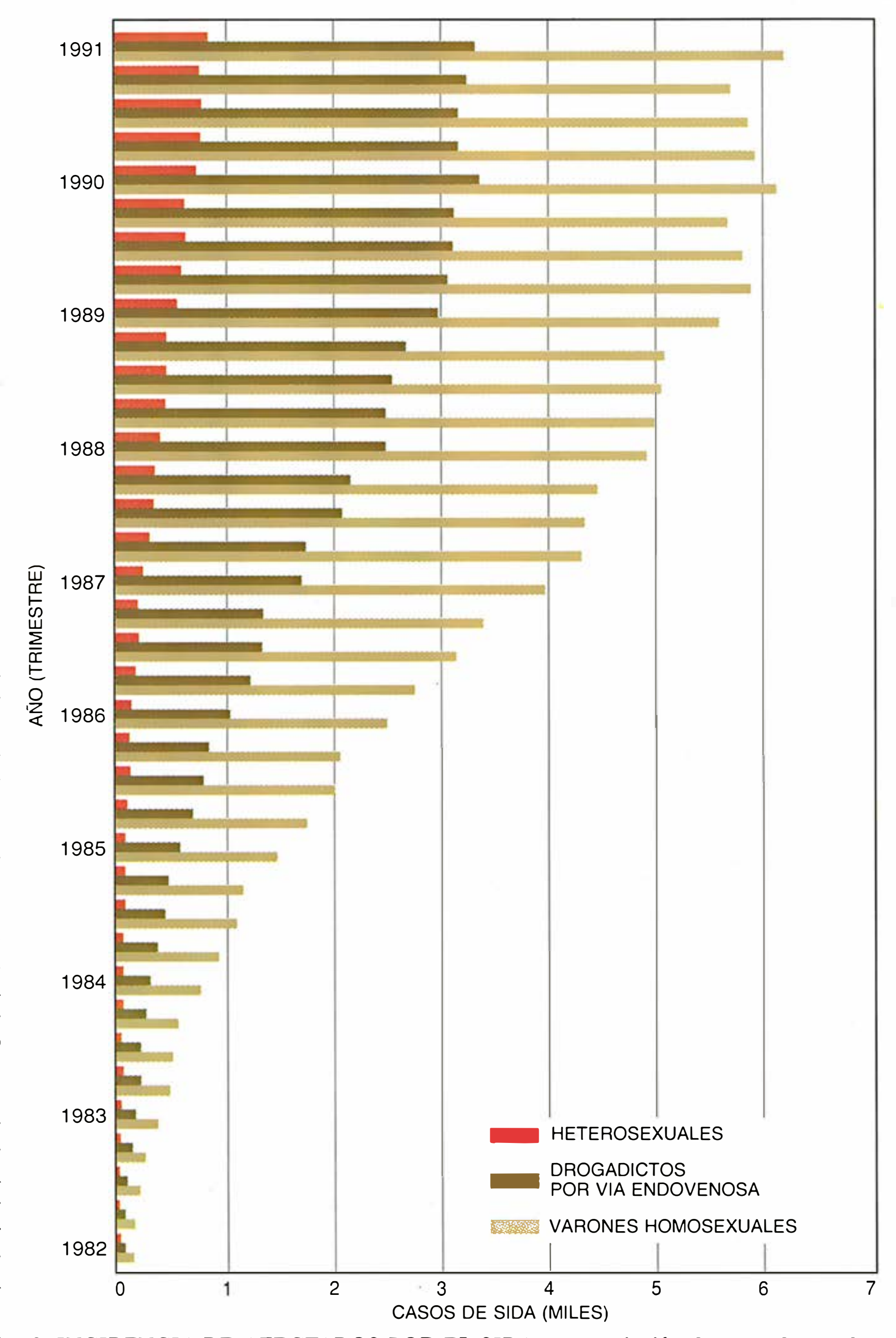
Para el VIH, R_0 viene a ser el producto de tres factores: la probabilidad media de que una persona portadora infecte a su pareja durante la relación sexual, el promedio de parejas distintas que ha formado por unidad de tiempo y la duración media de infectividad. Aunque esta definición sencilla esconde muchas complicaciones, sirve para centrar la atención en qué es lo que debe medirse para conocer la velocidad de propagación del morbo.

Esa definición de R_0 lleva asociadas dos complicaciones que no podemos olvidar: se trata de un valor que difiere significativamente de un grupo de riesgo a otro y que dicho valor puede cambiar con el tiempo en respuesta a las modificaciones de las pautas de conducta. La variedad de las relaciones sexuales en una población dada importa sobremanera para determinar la propagación infecciosa: ¿Qué tipo de actividad sexual practica? ¿Con qué frecuencia? ¿Con cuántos se ha relacionado en un tiempo prefijado? ¿Cuál es la cadena que suele seguirse en la relación sexual? Cuestiones de las que, por desgracia, sabemos muy poco, en parte debido a la actitud de los gobiernos y de los individuos ante cualquier investigación de lo que es dominio privado del comportamiento de la persona.

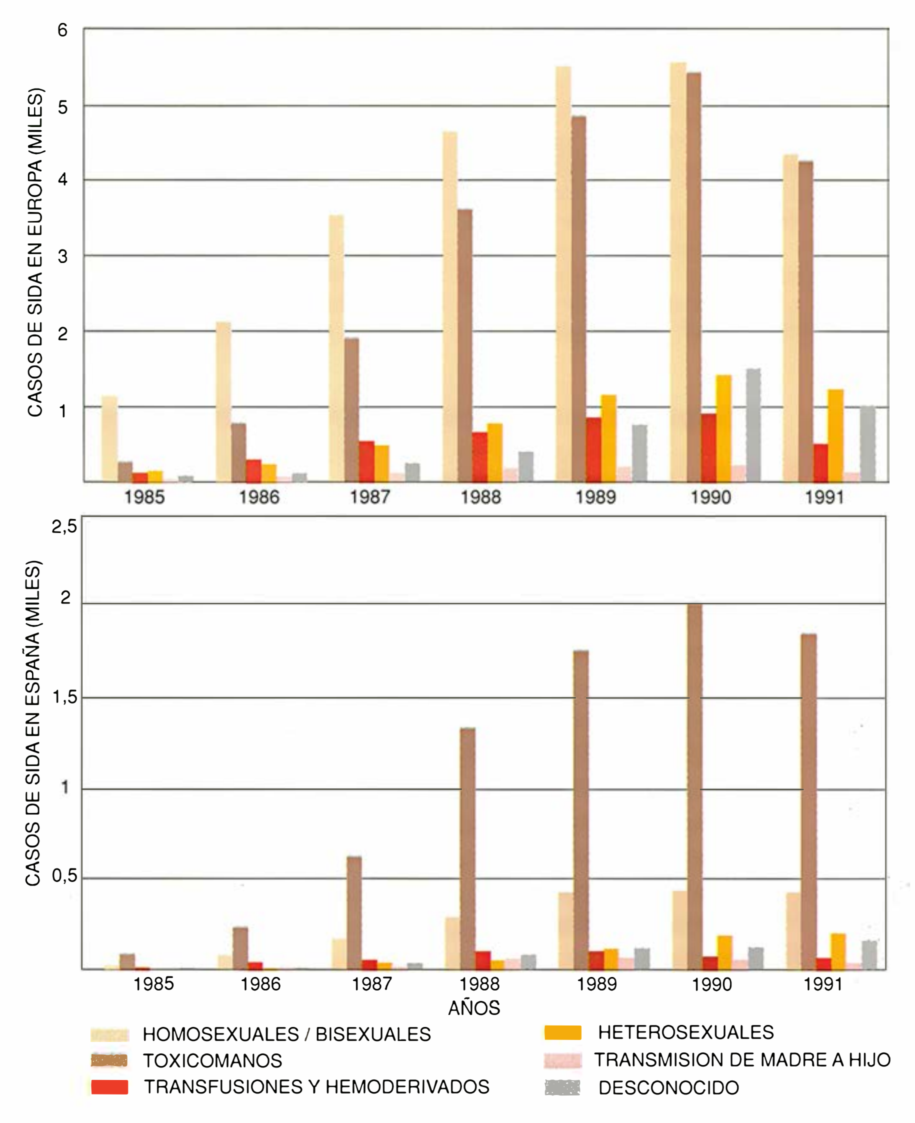
Los datos de que disponemos sobre la frecuencia de cambio de pareja sexual y la frecuencia de la relación revelan una amplia heterogeneidad en el seno de una población. Pero dentro de esta pluralidad reconocemos algunas pautas, que se mantienen bastante, a través de diferentes grupos (heterosexual y homosexual) y a través de diferentes marcos culturales (países desarrollados y subdesarrollados).

En la definición de R_0 podemos incorporar la noción de variabilidad en la conducta sexual mediante la sustitución del número medio de parejas sexuales que se han formado por unidad de tiempo con una expresión que tenga en cuenta la media y la varianza. Una varianza alta elevará el valor de R_0. Con bastante lógica, los individuos que cambian con frecuencia de pareja tienen más probabilidades de adquirir y de transmitir la infección. Las estadísticas consideran que constituyen una fracción pequeña del total de la población: entre el 20 y el 30 por ciento de los individuos de la muestra responden del 70 % de los emparejamientos sexuales registrados. Paradójicamente, pues, una varianza elevada aumenta el éxito global de la transmisión del VIH (en términos de R_0) y, por tanto, aumenta la probabilidad de que se produzca una epidemia; pero implica también que la infección quedará circunscrita, hasta cierto punto, a una fracción limitada de sujetos que son sexualmente muy activos.

El grado en que la infección quede ceñida a un pequeño núcleo de personas sexualmente muy activas dependerá de quién se mezcle con quién: la cadena de contactos sexuales entre los que son sexualmente muy activos y los que no lo son. Para definir esa cadena, hemos de preguntarnos no sólo por el número de parejas sexuales sino también por quiénes fueron aquellas parejas. Esta información es necesaria para determinar cada cuánto la pareja con que se ha yacido cambia, a su vez, de pareja. La comprensible renuencia de



3. INCIDENCIA DE AFECTADOS POR EL SIDA y su variación de acuerdo con los grupos de riesgo, en los Estados Unidos. Los datos de los tres grupos seleccionados cubren hasta junio de 1991. Son propiedad de la División del Centro para las Enfermedades Infecciosas VIH/SIDA.



4. AFECTADOS POR EL SIDA de acuerdo con los grupos de riesgo en Europa (*arriba*) y España (*abajo*).

los participantes para identificar a su pareja sexual dificulta enormemente esa encuesta.

A falta de datos, no nos queda más remedio que volver de nuevo a los modelos matemáticos para averiguar cuán importante sea adquirir tal información. Los modelos pueden revelar el grado en que un emparejamiento distributivo (igual con igual) influye en la epidemia. En este caso, no basta ya con definir una sola tasa de reproducción de infección, R_0. Se debe fijar una matriz, o conjunto, de tasas reproductoras para caracterizar la transmisión de la infección dentro de los grupos y de unos a otros. Según sea la pauta de emparejamiento entre grupos, algunos elementos de la matriz de tasas reproductoras podrían ser mayores que 1 (la infección se disemina en el grupo en cuestión) y en otros podrían ser menores que 1 (la infección se extingue). En otras palabras, algunos grupos podrían mantener la infección en la población global y, sin ellos, acabaría por desaparecer. De lo que se desprende que la educación debería centrarse en los individuos que promueven decididamente el éxito de la propagación de la infección.

La epidemia proyectada en el marco de una mezcla aleatoria es mucho peor que la contemplada en el caso distributivo. En el escenario distributivo, la infección comienza a propagarse con mayor celeridad: el núcleo restringido de individuos sexualmente muy activos, infectado, crea una pequeña epidemia. Pero su propagación en el grupo, más amplio, de los individuos menos activos sexualmente se mantiene limitada. Hemos de señalar, a este propósito, que tal emparejamiento altamente distributivo puede generar una epidemia que muestre múltiples picos, o máximos, a medida que vaya avanzando la infección desde los grupos de riesgo elevado hasta los grupos de bajo riesgo.

Rigen principios similares para abordar divisiones a mayor escala. En cualquier país que consideremos, la epidemia se desarrollará, verosímilmente, en trenes de ondas que cursan desde los grupos de alto riesgo hacia los de bajo riesgo, a través del contacto de un grupo con otro. Se forma una cadena de contacto a través de los eslabones siguientes: varones homosexuales, hombres bisexuales y mujeres heterosexuales. Otra cadena se engarza con drogadictos endovenosos heterosexuales y drogadictos heterosexuales no intravenosos. Por último, en una tercera ronda intervendrían mujeres prostitutas, sus clientes masculinos y las parejas femeninas de los clientes. El que la epidemia total se manifieste a través de una sucesión de picos o lo haga mediante un solo máximo de relativa suavidad dependerá del tamaño de cada grupo de riesgo y, sobre todo, del grado de contacto entre distintos grupos.

En bastante países de Occidente se ha alcanzado ya la cota máxima de infecciones por VIH entre los varones homosexuales. Estamos asistiendo ahora a una segunda epidemia, que no ha llegado todavía a su apogeo, entre los adictos a drogas endovenosas. Ha comenzado la tercera ola, entre los heterosexuales, si bien desconocemos en este momento la medida exacta de sus proporciones. En los países en desarrollo, y sobre todo en el Africa subsahariana, el pico precoz registrado entre las mujeres prostitutas se está quedando chico ante la difusión generalizada de la infección entre la población heterosexual general. En el sudeste asiático comienza a dibujarse un patrón similar, aunque en Thailandia la primera ola correspondió a los adictos a drogas por vía endovenosa, así como a las prostitutas. Lo mismo en Africa que en Asia, la infección por VIH se ha propagado lo suficiente entre la población general como para despertar nuestra preocupación sobre las consecuencias demográficas y económicas que aparecerán en las próximas décadas.

Para calcular el impacto demográfico del SIDA en las regiones más castigadas del mundo, tenemos que idear modelos que combinen la explicación de la propagación del VIH con la del crecimiento de la población. Los primeros análisis de 1988 sugerían que el SIDA podía convertir tasas de crecimiento positivas en tasas negativas, a lo largo de determinados períodos de tiempo, desde pocos hasta muchos decenios. Las mismas tasas de crecimiento demo-

gráfico cifradas en un 3 por ciento o más en Africa subsahariana podrían cambiar de signo. Pero esas predicciones de primera hora se vieron rodeadas por un nube de escepticismo, fomentado en particular por la falta de seguridad en la asignación de parámetros y por la fallida explicación justa de las diferencias en la actividad sexual entre las comunidades y en el seno de las mismas.

Con los años, la investigación ha ido acumulando datos que ayudan a calcular los parámetros de interés epidemiológico, si bien persisten dudas de peso en todos esos empeños. Los estudios realizados en países desarrollados revelan que la media del período de incubación del SIDA en los casos transmitidos de la madre gestante al hijo de sus entrañas es de 1 a 2 años. Aproximadamente, del 13 al 30 % de los niños recién nacidos de madres infectadas en países desarrollados portan la infección; la cifra roza el 40 % en Africa.

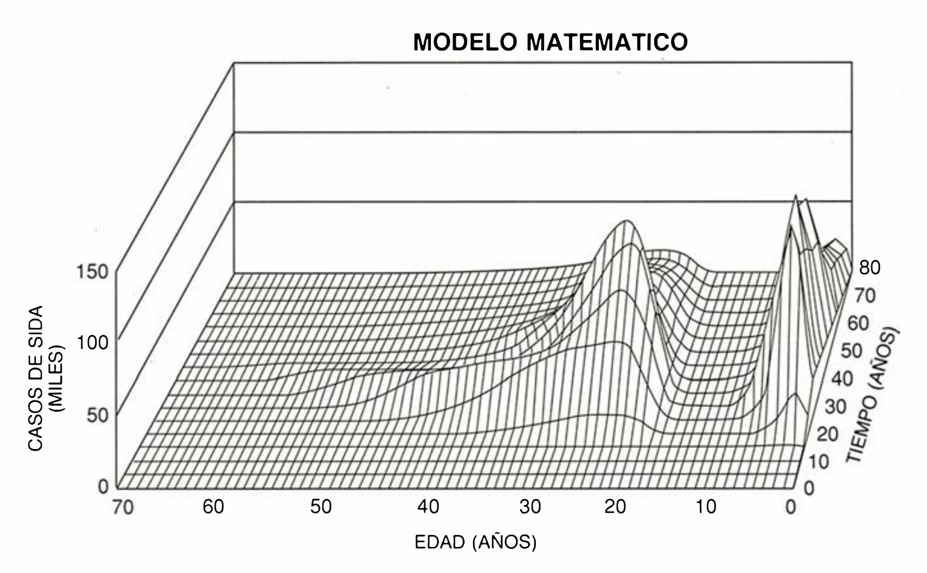
El grueso de la inseguridad en el cálculo de la velocidad de transmisión se centra sobre las pautas dominantes de conducta sexual entre comunidades y dentro de las mismas. La OMS ha iniciado encuestas a gran escala acerca de la conducta sexual en Africa; ha comenzado la llegada de datos. En este momento, el conocimiento que se tiene de los procesos que dictan la conducta sexual en las diferentes sociedades resulta, además de escaso, de carácter anecdótico.

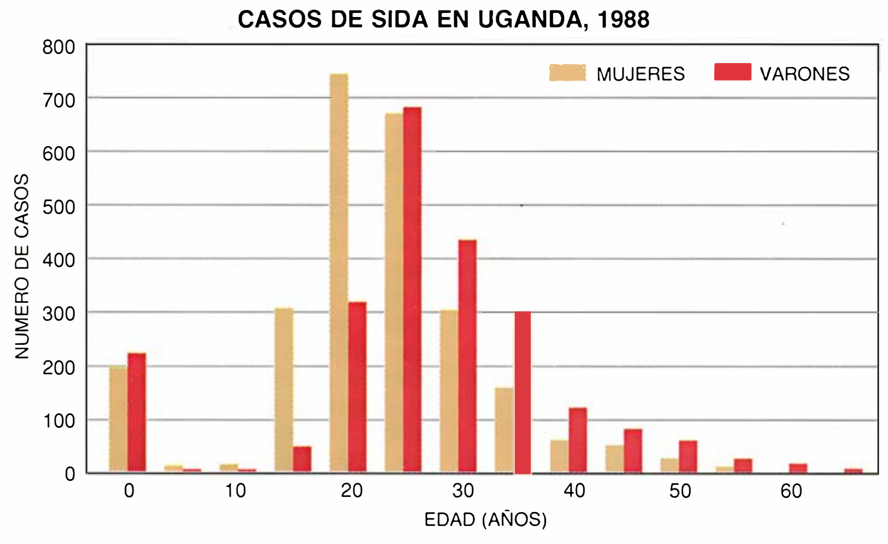
Una vez más, los modelos matemáticos pueden servirnos de orientación; ahora, a propósito de la identificación de las vinculaciones de la actividad sexual con las pautas de propagación del VIH observadas. En los últimos años, han aparecido modelos que abordan distintos aspectos de la cuestión, aunque hemos de reconocer que la teoría ha ido mucho más allá de lo que respaldan los datos disponibles. Los modelos tienen por función principal trazar las grandes líneas directrices sobre la interpretación de las pautas observadas. El modelo debe también aportar un marco en cuyo interior calibrar el impacto potencial de los distintos factores. La situación se comprende mejor a través de una introducción gradual de la complejidad, a la manera en que trabaja el científico experimental, quien va modificando un factor cada vez, dejando constantes los demás.

Para ilustrar qué pueden mostrarnos esos modelos, consideremos dos ejemplos del efecto de variabilidad de los contactos sexuales sobre el efecto potencial del SIDA en Africa. Nuestro primer ejemplo se refiere a la influencia de las pautas de contacto entre diferentes clases de edad de los dos sexos. En particular, nos centramos en la tendencia de los hombres africanos a mantener relaciones sexuales con mujeres que son de 5 a 10 años más jóvenes que ellos. A igualdad de los demás factores, los modelos que tienen en cuenta la disparidad de edades sugieren un impacto demográfico altamente significativo si lo comparamos con las previsiones fundadas en contactos restringidos dentro de la misma clase de edad. Ese mayor impacto síguese de la concentración de la infección en las jóvenes que acaban de entrar en la pubertad. Los modelos abonan la idea de que la proporción de infecciones por VIH en los hombres con relación a las mujeres puede cambiar en el curso de la epidemia. Ese cambio de tendencia puede ayudar a entender por qué se han presentado cifras muy dispares relativas a Africa, registrándose una razón de hombre a mujer de 1:1 a 1:2.

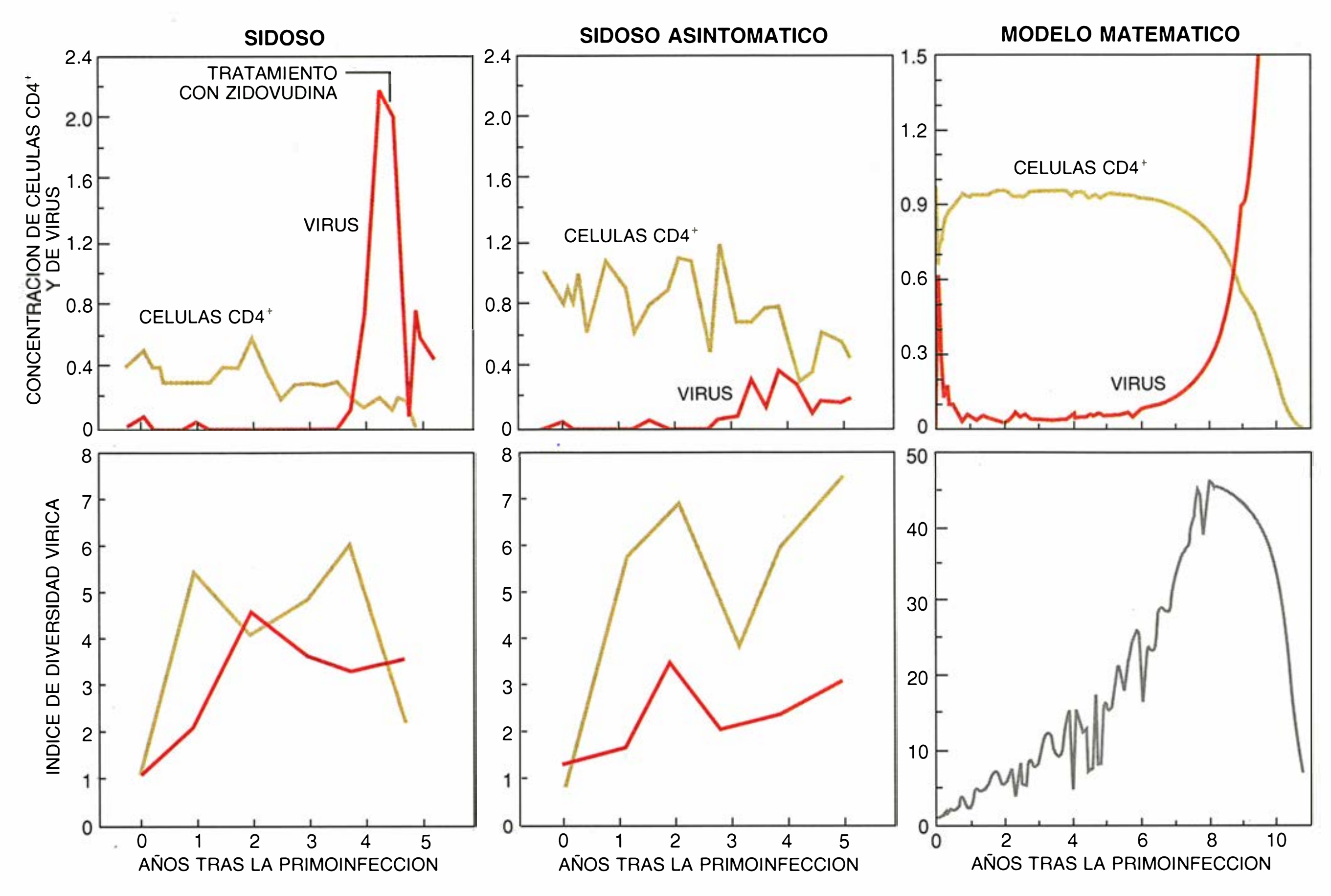
Nuestro segundo ejemplo concierne a las pautas de promiscuidad entre hombres y mujeres con elevada y baja frecuencia de cambio de pareja. El modelo más sencillo —que se funda en la estratificación de la población por sexos y clases de actividad sexual— ilustra bien la significación de las redes de contacto sexual.

Puede producirse una epidemia generalizada, cuando los varones entregados a una frecuente actividad sexual (por ejemplo, los emigrantes a los centros urbanos) tienen un gran número de contactos sexuales con mujeres de alta actividad (prostitutas), pero tam-





5. EFECTOS DEMOGRAFICOS DEL SIDA según un modelo matemático y según lo observado en Uganda, comparados. El impacto pronosticado por un modelo matemático, estructurado por edades, de transmisión del VIH comparte semejanzas fundamentales con la distribución observada según edad y sexo de casos de SIDA en Uganda durante 1988. En particular, los resultados extraídos del modelo y los datos reales muestran dos picos en la incidencia del SIDA, uno en niños y otro en adultos.



6. CURSO DE LA INFECCION DEL SIDA en dos hombres homosexuales y residentes en Amsterdam (*columnas izquierda y centro*). Remeda bastante bien los resultados de un modelo matemático sencillo (*columna derecha*). Las gráficas de la fila superior representan la cantidad de virus y la de leucocitos CD4$^+$. Las gráficas de la fila inferior muestran que la variabilidad genética del virus suele crecer con el tiempo. Las curvas roja y marrón de las gráficas inferiores izquierda y centro se refieren a los dos índices empleados para medir la diversidad que presenta el agente agresor.

bién tienen algún contacto con mujeres de baja actividad (esposas o novias). El brote epidémico, de progreso rápido, comienza en el núcleo restringido de varones y mujeres de alta tasa de promiscuidad. Acontece luego una expansión más lenta, y más amplia también, del foco inicial. Esta segunda oleada abarca a los varones y mujeres de baja actividad sexual que integran la mayoría de la población. La epidemia en las clases de elevada promiscuidad sirve de semilla para la epidemia de progreso lento. Entre el pico de una oleada y el de la otra pueden transcurrir uno o varios decenios.

El escenario predicho por este modelo sencillo puede reflejar qué está ocurriendo hoy en Nairobi y otras ciudades por el estilo. Allí, los niveles de infección son altos en las prostitutas (del 60 al 80 por ciento), entre moderados y altos en sus clientes masculinos (del 20 al 40 por ciento) y bajo en las mujeres embarazadas de la población general (del 5 al 6 por ciento). El modelo aventura que estos bajos niveles en la población general subirán a lo largo de los próximos diez años, crecimiento que anunciará una segunda epidemia, mucho mayor, parecida a la sufrida por ciudades de Malawi, Tanzania y Uganda.

Con los datos en la mano, y si no se opera un cambio radical en las pautas de conducta o se crean fármacos más eficaces, el SIDA acabará por provocar, en los decenios que vienen, graves trastornos demográficos en determinados países de Africa. Destino al que parecen abocadas ciertas regiones de la India y del sudeste asiático.

¿Qué hacer para detener la propagación de la infección? Los modelos que calculan la influencia de los cambios de conducta en la velocidad de avance destacan el interés de acometer a tiempo dichas modificaciones. Los efectos de la temporización no son algo obvio ni intuitivo por necesidad, habida cuenta del carácter no lineal de la epidemia. Los cambios introducidos en un momento precoz de la marcha de la epidemia ejercen un efecto mayor, sin comparación, que los realizados en una fase tardía. Por cuyo motivo, habrán de encarrilarse los recursos hacia la inducción de cambios en el comportamiento, si queremos evitar, dentro de 10 o 20 años, una epidemia letal y ampliamente extendida.

Un énfasis denodado en la educación de los grupos de alto riesgo, junto con la distribución entre los mismos de preservativos, resultará provechosa en los estadios precoces de la epidemia, cuando se halla todavía limitada la infección en la población general. Se trata de unas medidas políticas que beneficiarían a países como Nigeria, donde los niveles de infección por VIH en grupos de alto riesgo (prostitutas y sus clientes varones) son de bajas a moderadas y los niveles son muy bajos en mujeres embarazadas. Si las pautas de emparejamiento muestran un carácter netamente distributivo, la atención política deberá centrarse en los grupos de alto riesgo. Podría incluso resultar que la tasa de promiscuidad en la población heterosexual general sea insuficiente para mantener la transmisión del VIH. Pero si la infección ha alcanzado un grado

significativo en grupos de bajo riesgo, como en el caso de Malawi, Tanzania y Uganda, debe promoverse la educación y la distribución de preservativos entre la comunidad de riesgo. Los modelos sugieren que el esfuerzo debe mirar, sobre todo, a los adolescentes antes de que inicien una sexualidad activa.

La sutil interacción entre tasa de promiscuidad, pautas de emparejamiento entre clases de actividad sexual y necesidad de equilibrar oferta y demanda sexual puede desencadenar resultados perversos. La reducción de la tasa de promiscuidad en la población general ofrece un ejemplo interesante. Imaginemos una sociedad desinhibida ante la relación sexual. La mayoría de hombres y mujeres tendrán a lo largo del año varias parejas sexuales diferentes y un consiguiente contacto limitado de los varones con las prostitutas. Si la educación reduce la tasa de promiscuidad de la mujer, los hombres buscarán un trato más asiduo con las prostitutas, lo que terminará por acelerar la velocidad de propagación del virus en la población general a corto plazo. A largo plazo, sin embargo, el tamaño total de la epidemia podría reducirse. El ejemplo ilustra la necesidad de ponderar la incidencia de de la educación, no sólo en la tasa de promiscuidad, sino también en las pautas de emparejamiento sexual dentro de una comunidad.

De manera más general, los datos que se van acumulando resaltan la importancia de otras enfermedades de transmisión sexual (ETS), que redoblan, así parece, la probabilidad de transmisión del VIH, a través de las lesiones genitales que pueden causar las ETS. Esas observaciones ponen de manifiesto la necesidad de controlar la propagación de ETS en países en vías de desarrollo, sobre todo en Africa. Y avalan ese empeño modelos sencillos sobre la transmisión del VIH y de las concomitantes ETS. Otra ventaja que resulta del mayor control de las ETS es que los programas facilitan el asesoramiento y la distribución de preservativos a aquellos segmentos de la población con alto riesgo.

Los países desarrollados disponen de otro recurso para amortiguar los efectos del SIDA: la prescripción de la zidovudina y otras drogas que enlentecen el curso de la enfermedad. En un ensayo a doble ciego realizado en Estados Unidos se sometieron a prueba dos niveles distintos de dosificación de zidovudina (500 o 1500 miligramos por día) y un placebo en pacientes asintomáticos. El ensayo se suspendió antes de concluirlo porque los pacientes que habían recibido zidovudina mostraban una reducción considerable en la velocidad de avance del SIDA y del complejo relacionado con SIDA adelantado (CRS).

El tratamiento con zidovudina podría, en algunas circunstancias, ejercer un efecto negativo. Aunque el tratamiento prolonga la vida y resulta, por tanto, bueno para el individuo, hay situaciones en que puede de ello resentirse la comunidad. De acuerdo con la eficacia del tratamiento en la suspensión del proceso morboso, algo de lo que no tenemos seguridad, podría ocurrir que la prolongación del período de incubación o el sintomático en individuos tratados aumentara la incidencia de VIH en el seno de la comunidad. En circunstancias extremas, el resultado podría ser una mayor mortalidad por SIDA en la población. Mas, considerando que el SIDA es una enfermedad letal y que la zidovudina parece retrasar la progresión, no sería ético negarles el tratamiento a los afectados. Lo que no obsta para que los modelos matemáticos confirmen la posibilidad de que lo beneficioso para el individuo no lo sea necesariamente para la comunidad.

Se necesita, pues, investigación virológica de naturaleza cuantitativa para medir la incidencia de la terapia con drogas en la infectividad y para que una infección controlada forme parte del protocolo de desarrollo de drogas. Además, estas consideraciones subrayan la ventaja de vincular el tratamiento con el asesoramiento para promover prácticas de sexo seguro entre los individuos tratados.

A falta de medicamentos y vacunas eficaces, sólo los cambios en el comportamiento sexual constituyen la única arma contra el SIDA. Los modelos matemáticos, con sus esporádicas sorprendentes revelaciones, en contra de la intuición, pueden canalizar ciertos cambios por caminos más ventajosos.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

INFECTIOUS DISEASES OF HUMANS: DYNAMICS AND CONTROL. Roy M. Anderson y Robert M. May. Oxford University Press, 1991.

THE SPREAD OF HIV-1 IN AFRICA: SEXUAL CONTACTS PATTERNS AND PREDICTED DEMOGRAPHIC IMPACT OF AIDS. R. M. Anderson, R. M. May, M. C. Boily, G. P. Garnett y J. T. Rowley en *Nature*. vol. 352, n.º 6336, págs. 581-589; 15 de agosto de 1991.

Funciones biológicas del óxido nítrico

Escurridizo y oscuro hasta ayer mismo, este compuesto empieza a ocupar un lugar de privilegio entre los considerados de interés fisiológico. El óxido nítrico podría ser el primero de una nueva clase de neurotransmisores

Solomon H. Snyder y David S. Bredt

Parecía impensable que una sustancia tan tóxica, pequeña y de estructura elemental como el óxido nítrico constituyera una especie de factótum biológico. La mayoría de las funciones del organismo están reguladas por proteínas y otros macrocompuestos de extraordinaria complejidad. Las herramientas de la moderna biología molecular nos han acostumbrado a ver sustancias químicas de refinada estructura, así la de la hormona testosterona o el interferón gamma, una de las proteínas del sistema inmunitario.

Se trata de estructuras cuya complejidad resulta provocadora al lado de la modesta sencillez de la molécula del óxido nítrico. El óxido nítrico, o NO, es un gas en las condiciones ambientales. No hay que confundirlo con el óxido nitroso, el N_2O, el gas hilarante que se usa en anestesia. El óxido nítrico es un tóxico poderoso por su estructura de radical libre: posee un electrón extra que le confiere una enorme reactividad química. Aunque desde hacía tiempo se sabía que las bacterias contenían óxido nítrico, nadie sospechó que semejante compuesto tan reactivo desempeñara alguna función decisiva en el organismo de los mamíferos.

Así, hasta hace cinco años. Una serie de descubrimientos, procedentes de líneas de investigación diferentes, revelaron entonces una amplia gama de funciones importantes del óxido nítrico, hasta el extremo de convertirlo en uno de los principales mensajeros biológicos quizás. Confiere a los leucocitos de la sangre la capacidad de matar células tumorales y bacterias, y es también un mediador de los neurotransmisores en el proceso de vasodilatación.

El óxido nítrico es un mensajero que actúa de manera parecida a como lo hacen los neurotransmisores. Se halla al servicio de las neuronas del cerebro y de otras partes del cuerpo. Podría muy bien ser, en efecto, el primero de una serie de neurotransmisores distintos de los que hasta ahora conocíamos. La comprensión de los mecanismos moleculares de este potente compuesto, su distribución y sus relaciones con otros agentes importantes del organismo han proporcionado pistas que pueden ser decisivas en la investigación de la memoria y en la búsqueda de tratamientos de algunas enfermedades degenerativas del sistema nervioso.

Los resultados de los primeros trabajos sobre el óxido nítrico no presagiaban, en absoluto, que este compuesto, extremadamente lábil, reportara algún beneficio para el organismo. Su vida es tan efímera que sólo dura entre seis y diez segundos, y como consecuencia de su reacción con el oxígeno y el agua se convierte en nitratos y nitritos. Aunque el hombre elimina nitratos, creíase que la presencia de estos compuestos en sus excretas dependía exclusivamente de la dieta. Por esta razón, cuando en 1956 P. N. Magee y J. M. Barnes, del Consejo de Investigaciones Médicas de Surrey, pusieron de manifiesto la conversión, en el organismo, de los nitratos de los alimentos curados en nitrosaminas carcinogénicas, la gente se apresuró a cambiar sus hábitos evitando el tocino y otros alimentos curados que poseyeran un alto contenido en nitratos.

En 1981, el equipo de Steven R. Tannenbaum, del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT), advirtió que tanto el hombre como la rata mantenidos con dietas bajas en nitratos seguían eliminando cantidades apreciables de nitratos. Era obvio, por tanto, que la dieta no podía ser la fuente exclusiva de éstos. Pero, ¿de dónde procedían? El propio Tannenbaum encontró una pista valiosa en uno de los sujetos que estaba estudiando: un hombre que excretaba por la orina cantidades muy elevadas de nitratos en el que se daba la circunstancia de padecer una diarrea infecciosa. El proceso inflamatorio asociado con la diarrea era, al parecer, el responsable de la formación de nitratos. Tannenbaum advirtió que la inyección de endotoxina bacteriana, que provoca una respuesta inflamatoria, estimulaba en la rata la excreción de nitratos.

El origen preciso de esos nitratos, así como la relación entre ellos y la respuesta inflamatoria, quedaron finalmente aclarados gracias a los trabajos de Michael A. Marletta, de la Universidad de Michigan, Dennis J. Stuehr (alumno suyo) y de John B. Hibbs, Jr., este último de la Universidad de Utah. Marletta, que había colaborado con Tannenbaum en el MIT, se había planteado ya el papel que el sistema inmunitario podría desempeñar en la formación de nitratos inducida por la endotoxina. Marletta

SOLOMON H. SNYDER y DAVID S. BREDT han trabajado juntos desde 1989 en la facultad de medicina de la Universidad Johns Hopkins, cuyo departamento de neurociencias dirige Snyder, pionero en el campo de los neurotransmisores. Bredt se formó en química en la Universidad de Princeton, pero se doctoró por la de Johns Hopkins. Se ha especializado en la función biológica del óxido nítrico.

1. LAS NEURONAS TEÑIDAS adquieren color herrumbroso si contienen óxido nítrico sintasa (NOS), la enzima que sintetiza óxido nítrico a partir de arginina. Las neuronas de color azul grisáceo no contienen NOS.

descubrió que los ratones que padecían una determinada alteración genética de sus macrófagos eliminaban pocos nitratos. Con ello estableció la relación existente entre el funcionamiento de los macrófagos y la presencia de nitratos.

Siguió adelante con su experimentación y preparó cultivos de los macrófagos deficientes. Introdujo, entonces, en el medio de cultivo la endotoxina junto con interferón gamma, una proteína moduladora del sistema inmunitario producida por los linfocitos *T* y que es un activador de otras células de este sistema. Sin tardar, los macrófagos empezaron a producir nitratos.

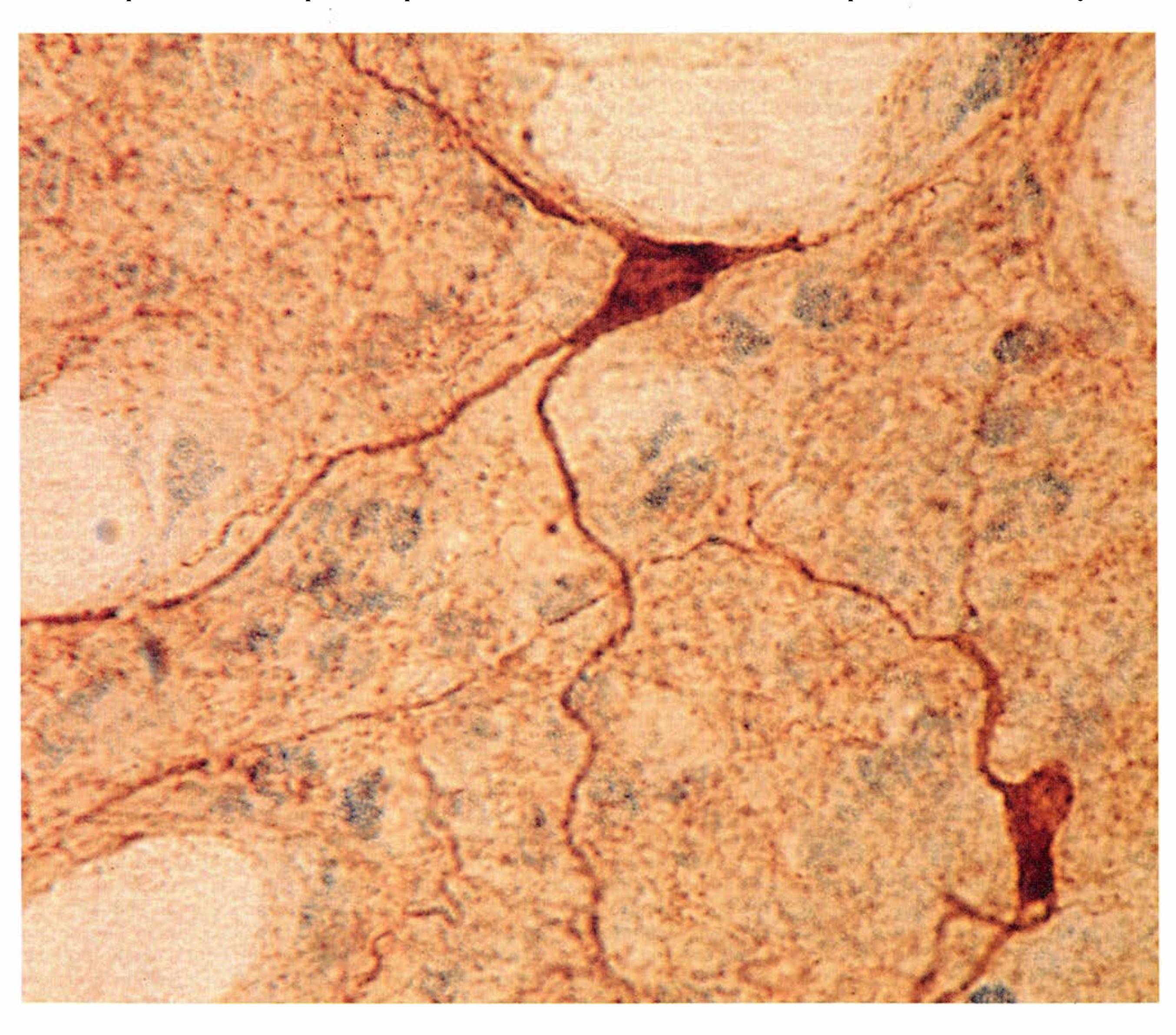
Al ir cambiando de manera selectiva las condiciones del medio de cultivo, Marletta descubrió también que los macrófagos no producían nitratos si no había arginina, un aminoácido que suele agregarse al medio de incubación. Este hallazgo le permitió demostrar que una enzima específica presente en los macrófagos convertía la arginina en un intermediario químico. Este compuesto resultó ser el óxido nítrico que rápidamente se transforma en nitritos y nitratos.

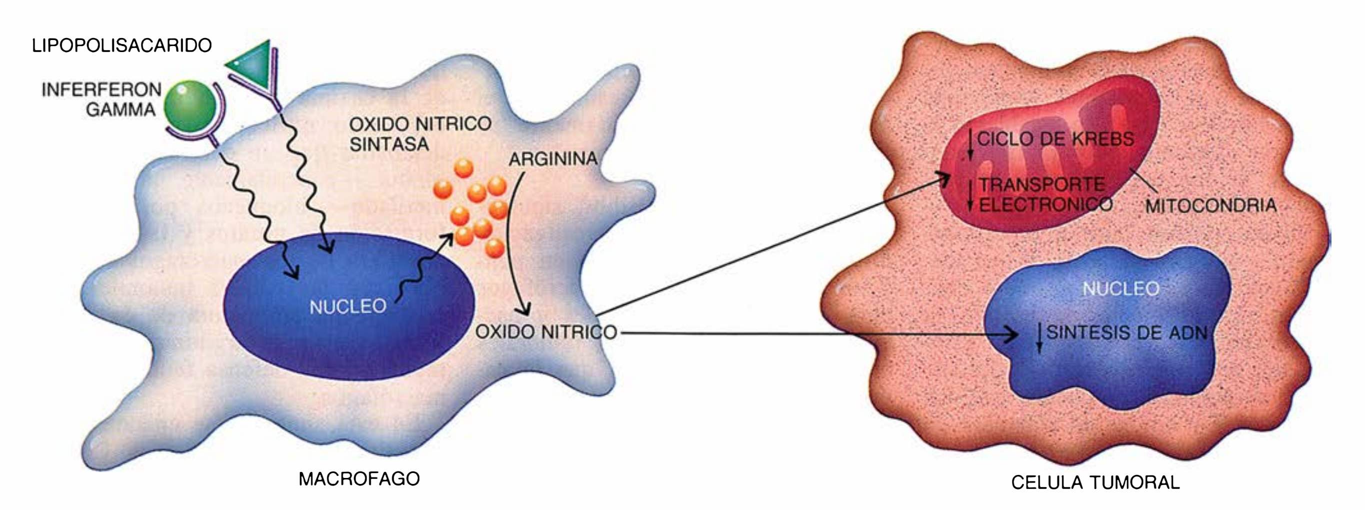
Al mismo tiempo, Hibbs, siguiendo una línea de investigación diferente, andaba empeñado en ponderar la capacidad de los macrófagos para matar células tumorales y bacterias. Al cultivar células tumorales con macrófagos, advertía que la capacidad de los macrófagos para matar células tumorales desaparecía en cuanto la arginina se eliminaba del medio. Demostró también que la arginina se convertía, no sólo en nitratos, sino también en el aminoácido citrulina. Aportó con ello una prueba de que una enzima específica era la responsable de la producción de óxido nítrico a partir de arginina.

Hibbs llegó a la conclusión de que el óxido nítrico era un gas tóxico para las células tumorales, como lo eran también los macrófagos activados. E identificó el primer inhibidor de la enzima que cataliza la síntesis del óxido nítrico, lo que logró al demostrar que un derivado de la arginina —concretamente un derivado metilado— bloqueaba por igual la formación de nitratos y la capacidad mortífera de los macrófagos en relación con las células tumorales. Sin una enzima productora de óxido nítrico a partir de arginina, no podría montarse una defensa fundada en los macrófagos.

En esta situación se encontraba la investigación hace unos años. Cuando los macrófagos se activan mediante endotoxinas o por células *T*, responden convirtiendo arginina en óxido nítrico. Y el óxido nítrico, un radical libre muy tóxico, permite a su vez que los macrófagos maten bacterias, hongos y células tumorales.

En una serie de investigaciones sin relación alguna entre sí, se descubrió, pues, la función mensajera del





2. ESTIMULADORES DEL SISTEMA INMUNITARIO, como el interferón y el lipopolisacárido, transmiten señales al núcleo de un macrófago. Esas señales provocan la síntesis de óxido nítrico sintasa, la enzima que convierte arginina en óxido nítrico (NO). El NO destruye las células tumorales al inhibir la síntesis de ADN y la actividad del ciclo de Krebs y del transporte electrónico, dejando a la célula sin posibilidades de aprovechar la energía metabólica.

óxido nítrico. Al mencionar esos aspectos de la historia del óxido nítrico debemos considerar dos partes. La primera incluye los mecanismos mediante los cuales los neurotransmisores dilatan los vasos sanguíneos; la segunda se ocupa de los fármacos que alivian los síntomas de la angina de pecho, una afección cardiaca en la que se produce una constricción de las arterias coronarias del corazón. Ambas líneas de investigación han coincidido recientemente revelándonos más detalles acerca de las complejidades de las funciones del óxido nítrico.

Los vasos sanguíneos se dilatan por acción de ciertos neurotransmisores, como la acetilcolina, que provocan una relajación de los músculos de los vasos. En contrapeso de este efecto, otros neurotransmisores, así la norepinefrina, contraen los músculos de los vasos dando lugar a una vasoconstricción. Como los receptores de la norepinefrina se encuentran en las células musculares, la mayoría de los científicos suponían sin más que esas mismas células poseerían también receptores de acetilcolina.

En 1980, se demostró que esa idea era equivocada. Ese año, Robert F. Furchgott, eminente farmacólogo cardiovascular del Hospital de Downstate de Brooklyn, advirtió que la relajación de los vasos sanguíneos no se producía si se les privaba de su endotelio. El endotelio está constituido por una capa delgada de células que recubre el interior de los vasos sanguíneos, inmediatamente adyacente a la capa muscular. En una serie de experimentos, Furchgott demostró que la acetilcolina actúa sobre los receptores localizados en las células endoteliales. Esta acción provoca la liberación de una molécula pequeña que, por difusión, llega hasta la capa muscular adyacente y la relaja.

El establecimiento de la naturaleza de esta molécula misteriosa, que pronto recibió el nombre de factor relajante derivado del endotelio (FRDE), resultó ser una tarea poco menos que imposible. Furchgott y Louis J. Ignarro, de la Universidad de California en Los Angeles, entre otros muchos, intentaron sin éxito aislar este compuesto tan lábil. A pesar de esa resistencia del FRDE a dejarse identificar, se obtuvo un descubrimiento importante: la demostración de que el FRDE estimula la formación de guanosina monofosfato cíclico (GMPc), uno de los llamados segundos mensajeros de neurotransmisores y hormonas. El GMP cíclico está emparentado estructuralmente con otro segundo mensajero, bastante más conocido, el AMPc o adenosina monofosfato cíclico.

Se avanzaba, a la vez, en otro campo de la investigación que había de encontrar una relación con el trabajo de Furchgott y de Ignarro. Ferid Murad, de los Laboratorios Abbott, y otros se afanaban en penetrar en las complejidades del mecanismo de acción de la nitroglicerina en el tratamiento de la angina de pecho. Este potente fármaco alivia los síntomas de la parada cardiaca dilatando las arterias coronarias y las venas que riegan el corazón. La nitroglicerina, el compuesto químico que constituye el ingrediente activo de la dinamita, fue un invento de Alfred Nobel, creador del premio que lleva su nombre. Sus efectos terapéuticos eran ya bien conocidos a finales del siglo XIX. Nobel, que padecía de angina de pecho, escribió a un amigo suyo acerca de esos efectos: "Parece como una ironía del destino que sea mi médico quien me prescriba la nitroglicerina para que la tome internamente." El éxito terapéutico del fármaco dio lugar a la síntesis de numerosos derivados (los nitratos orgánicos), que siguen siendo el fundamento del tratamiento de la angina.

Aunque Nobel había descubierto el compuesto casi un siglo antes, no ha sido hasta los años setenta cuando empieza a comprenderse el mecanismo molecular de la nitroglicerina. Murad, que entonces trabajaba en la Universidad de Stanford, descubrió que la nitroglicerina y los nitratos orgánicos eran inactivos por sí mismos, aunque provocan la relajación de los vasos sanguíneos una vez que se han convertido metabólicamente en óxido nítrico. Más aún, el óxido nítrico relaja el músculo al estimular la formación de GMP cíclico, de la misma manera como lo hace el FRDE. Dos líneas de investigación, la del FRDE y la de la nitroglicerina, acababan, pues, convergiendo.

Hacia 1986, Furchgott e Ignarro predijeron que el óxido nítrico, u otro compuesto estrechamente relacionado con él, podría explicar la actividad del FRDE. Salvador Moncada y sus colaboradores, de la Wellcome Research Laboratories en Beckenham, estimularon la liberación de FRDE en las células endoteliales y registraron su efecto relajante sobre el músculo liso. Midieron también, al mismo tiempo, la cantidad de óxido nítrico liberado por el endotelio. El endotelio liberaba óxido nítrico en cantidades suficientes para explicar por completo la relajación de las células musculares adyacentes; por tan-

to, el óxido nítrico y el FRDE constituían una misma cosa. El grupo de Ignarro obtuvo pronto resultados semejantes. Además de provocar la relajación de los vasos sanguíneos, el óxido nítrico inhibe la coagulación de la sangre al obstaculizar la agregación de las plaquetas. Y se ha visto también que es el regulador normal de la erección del pene.

Hoy día se sabe que las funciones del óxido nítrico en el sistema vascular son aún más amplias. Aunque se daba por supuesto que otros compuestos, como la angiotensina y la norepinefrina, eran los determinantes principales de la presión sanguínea, posiblemente sea el óxido nítrico el regulador fundamental de ésta. Varios investigadores han administrado inhibidores de la óxido nítrico sintasa —la enzima que cataliza la síntesis del óxido nítrico— a animales y al hombre. Este tratamiento provoca un aumento rápido de la presión sanguínea, un aumento más notable que las alteraciones que se producen al administrar fármacos que afectan a la epinefrina o a la angiotensina. Asociados con la hipertensión o con otras alteraciones de la presión sanguínea podrían hallarse, en efecto, ciertos cambios en la regulación del óxido nítrico.

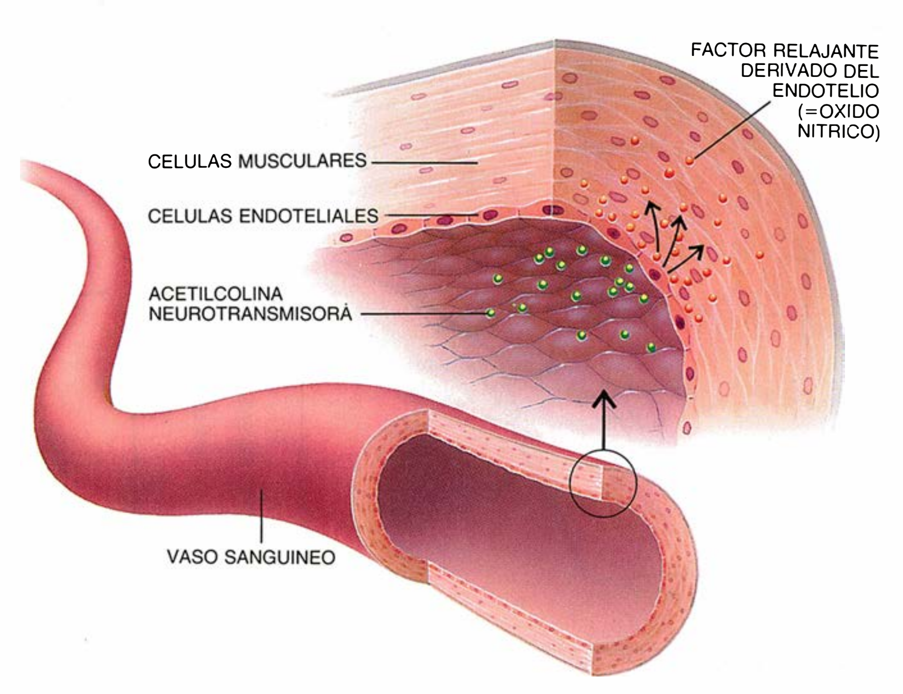
Los descubrimientos relacionados con las funciones del óxido nítrico se producen a un ritmo vertiginoso. El reconocimiento de su importancia en relación con el sistema vascular y con el sistema inmunitario es relativamente reciente. Pero otras noticias, que hacen referencia a sus funciones en el cerebro, son aún más recientes. La primera indicación de que el óxido nítrico podría tener relación con el sistema nervioso se produce en 1982. Takeo Deguchi, de Tokio, observó que la síntesis del óxido nítrico en el cerebro requiere arginina. Por supuesto, en aquel momento nadie sabía que el óxido nítrico fuese un mensajero, ni que se formase a partir de la arginina. En 1989 Moncada, en la Wellcome, pensó que la función de la arginina en la formación de GMP cíclico en el cerebro debía estar relacionada con la formación del óxido nítrico. En efecto, él mismo observó que en preparaciones de tejido cerebral se producía la síntesis de óxido nítrico.

Simultáneamente, se fueron acumulando más datos. John Garthwaite, de la Universidad de Liverpool, observó la formación de una sustancia de vida muy corta y que tenía las propiedades del óxido nítrico cuando estimulaba el tejido cerebral mediante la administración de glutamato. Este aminoácido, un neurotransmisor activador, promueve la transmisión sináptica en más lugares del cerebro que lo haga cualquier otro neurotransmisor. Sus efectos están mediados por varios subtipos de receptores. El mejor caracterizado de ellos es el receptor de NMDA, abreviatura de N-metil-D-aspartato, un aminoácido sintético que actúa selectivamente en este subtipo de receptor de glutamato. En los receptores de NMDA, el glutamato abre los canales del ion calcio, los controladores de la transmisión neuronal, enviando por tanto un potente impulso activador.

Sin embargo, cuando se libera en grandes cantidades, el glutamato puede causar daño al abrir esos canales. La propia muerte de neuronas durante la mayoría de los accidentes cerebrovasculares podría deberse a una cascada de glutamato que actuara sobre células ya privadas de oxígeno. El estrés añadido al tener que disparar sus respuestas más rápidamente en virtud de la estimulación por el glutamato agota y acaba por matar las células [véase "Tratamiento del accidente cerebrovascular" por Justin A. Zivin y Dennis W. Choi; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, septiembre de 1991]. El daño neuronal en los animales en que se ha inducido un accidente cerebrovascular puede evitarse, en buena medida, con fármacos que bloquean los receptores de NMDA. La industria ha respondido sin dilación. Son varias las compañías que han empezado a desarrollar antagonistas de NMDA como agentes terapéuticos potenciales en el accidente cerebrovascular.

La observación de Garthwaite según la cual la estimulación de los receptores de NMDA liberaba óxido nítrico convertía a este compuesto en mediador del glutamato. Así las cosas, decidimos, a principios de 1989, investigar una posible función del óxido nítrico en la transmisión sináptica. Como ya se sabía entonces que el óxido nítrico actuaba en los vasos sanguíneos a través del GMP cíclico, buscamos la región del cerebro donde se hubiera demostrado que el glutamato influyera sobre el GMP cíclico. Para nuestra fortuna, en los años setenta James Ferrendelli, de la Universidad de Washington, había añadido glutamato a cortes de cerebelo y había observado un rápido y pronunciado aumento del contenido de GMP cíclico.

Utilizando preparaciones semejantes de cerebelo, desarrollamos una técnica para medir la actividad de la enzima responsable de la síntesis de óxido nítrico, la óxido nítrico sintasa. Como la arginina produce óxido nítrico y citrulina en la misma proporción, seguíamos la conversión de arginina radiactiva en citrulina. Por tanto, la cuantía de citrulina registra-



3. LOS VASOS SANGUINEOS SE DILATAN cuando un neutransmisor, como la acetilcolina, se une a las células endoteliales situadas en las paredes interiores del vaso. Estas células liberan el factor relajante derivado del endotelio (FRDE), que se difunde hasta las células musculares adyacentes y provoca su relajación. En 1987 se vio que el FRDE y el óxido nítrico eran una misma cosa.

da en la medición nos indicaba que se había producido también la misma cantidad de óxido nítrico. Este método nos permitió observar que la actividad óxido nítrico sintasa se triplicaba cuando añadíamos NMDA o glutamato a los cortes de cerebelo. Nos sorprendió la enorme rapidez del efecto, que tenía lugar en cuestión de escasos segundos, cuando lo habitual es que el aumento de una actividad enzimática requiera mucho más tiempo.

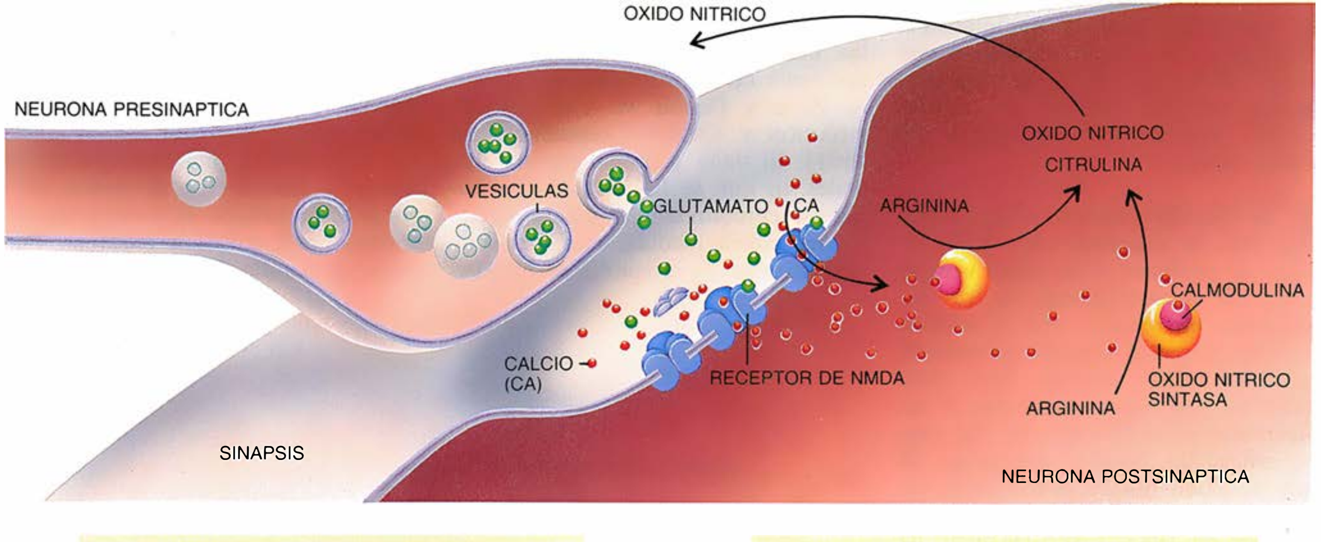
Con los mismos cortes confirmamos también que el NMDA provocaba una elevación considerable de los niveles de GMP cíclico. Decidimos examinar si existía alguna relación causal entre la formación de óxido nítrico y la de GMP cíclico. Esta cuestión se resolvió añadiendo a los cortes inhibidores de la óxido nítrico sintasa, concretamente metil arginina, un derivado de la arginina ya mencionado. La metil arginina bloqueó la formación de GMP cíclico a concentraciones iguales a las que inhibía la óxido nítrico sintasa. Al inhibirse los dos procesos por la misma cantidad de metil arginina, parecía clara la relación de ambos. Garthwaite y Moncada también observaron este bloqueo de la formación de GMP cíclico.

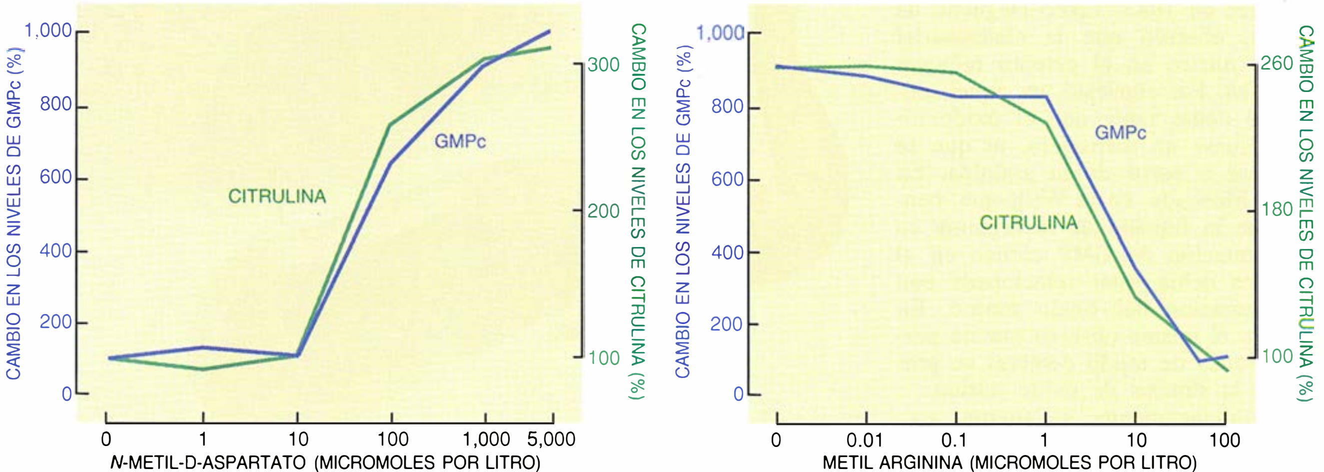
El paso siguiente fue explorar el lugar de acción del óxido nítrico en el cerebro. Normalmente, los científicos que estudian el sistema nervioso tamizan las funciones de una molécula importante buscando su presencia en neuronas específicas, asociadas con determinadas vías y funciones. Pero intentar localizar una molécula tan efímera como la del óxido nítrico parecía, ya de entrada, empresa condenada al fracaso. Por eso nos centramos en localizar la óxido nítrico sintasa.

La inmunohistoquímica proporciona uno de los medios más eficaces para la localización de proteínas. Se aplica a las muestras del tejido un anticuerpo de la molécula cuya presencia se quiere detectar. La molécula en cuestión, o antígeno, se une al anticuerpo. Se usan, entonces, varias técnicas, incluida la tinción, para marcar el lugar en que el anticuerpo se ha unido a su antígeno.

Antes de iniciar nuestros experimentos de inmunohistoquímica tuvimos que preparar los anticuerpos de la óxido nítrico sintasa; y, antes, aislar la enzima, tarea nada fácil. Probamos numerosas técnicas de purificación, pero con todas perdíamos rápidamente la actividad enzimática. Pensamos entonces que en algún paso de la purificación perdíamos un posible cofactor esencial para la actividad enzimática. Y con esa idea por delante intentamos purificar el hipotético cofactor.

Ese enfoque resultó bastante complicado. Pero no nos obstinamos en ese camino. Concentramos nuestros esfuerzos en hallar una pista racional que nos llevara a la solución de





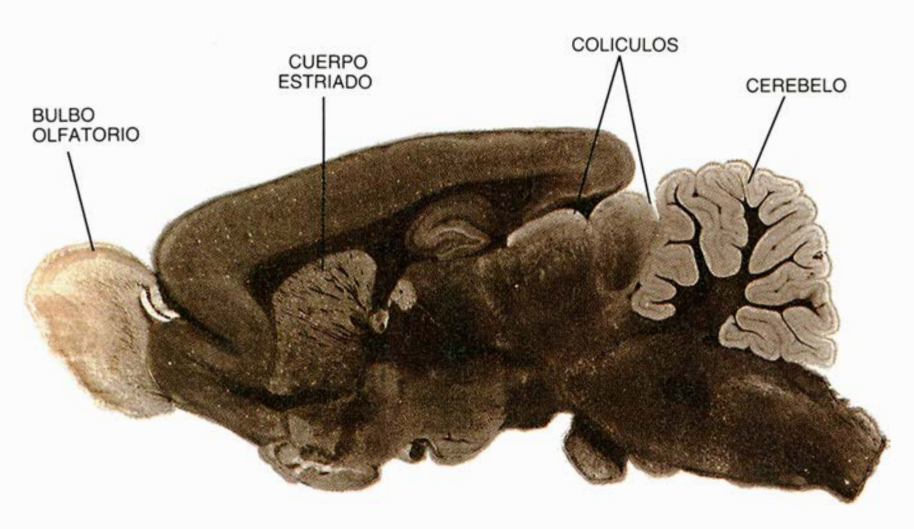
4. LAS NEURONAS LIBERAN NO cuando el glutamato se une al receptor de NMDA (*arriba*). Esa unión provoca la entrada de iones calcio en la neurona; los iones se unen a la calmodulina, que activa la NOS. La NOS convierte la arginina en citrulina y NO. Los niveles del GMP cíclico, segundo mensajero, y la citrulina aumentan cuando el receptor se activa (*izquierda*). Si la metil arginina inhibe la NOS (*derecha*), bajan los niveles de citrulina y GMPc, un reflejo del descenso en NO.

nuestro problema. Moncada había descubierto que la síntesis del óxido nítrico requería la presencia de calcio; este ion actúa a menudo unido a un cofactor bastante generalizado, la calmodulina. Añadimos una pequeña cantidad de calmodulina a algunas de nuestras preparaciones enzimáticas, e inmediatamente vimos que se producía una gran elevación de la actividad enzimática. La calmodulina resultó ser, por tanto, el cofactor clave para restituir la actividad de la óxido nítrico sintasa.

El reconocimiento de la asociación entre óxido nítrico, calcio y calmodulina nos permitió continuar con la purificación de la enzima. Y lo que es aún más importante, explicaba por qué los receptores de NMDA ponían en marcha la síntesis de óxido nítrico tan rápidamente una vez activado el sistema por el glutamato. Como es bien sabido, el glutamato da lugar a la transmisión sináptica en los receptores de NMDA al abrir los canales iónicos que promueven el movimiento de los iones de calcio desde el exterior hasta el interior de las neuronas. Por tanto, el glutamato hace que el calcio penetre en las células; los iones de calcio se unen entonces a la calmodulina y activan la óxido nítrico sintasa. Todo este proceso tiene lugar en cuestión de milisegundos.

Una vez purificada la proteína de la óxido nítrico sintasa, nosotros y Paul M. Hwang, alumno de doctorado de nuestro laboratorio, preparamos los anticuerpos contra ella. Seguimos entonces la pista de su presencia en el cerebro y en el resto del organismo. Nuestra observación más sorprendente fue la de que la óxido nítrico sintasa se halla presente, casi por entero, en las neuronas, células que constituyen sólo el 15 % de las cerebrales; el otro 85 % de las células del cerebro son células de la glía, que sirven de soporte y de apoyo metabólico a las neuronas. La enzima no estaba presente en absoluto en la glía.

Un dato interesante fue que la óxido nítrico sintasa se hallaba sólo en poblaciones muy particulares de neuronas. En la hipófisis, por ejemplo, la enzima aparece en neuronas cuyos cuerpos celulares se encuentran en el hipotálamo, desde donde se extienden hasta el lóbulo posterior de la hipófisis. Estas neuronas especiales sintetizan y liberan las hormonas vasopresina y oxitocina. En la médula suprarrenal, la óxido nítrico sintasa está muy concentrada en una red de neuronas que estimulan las células que liberan adrenalina o epinefrina. En el intestino, la enzima reside en un conjunto de neuronas que constituyen el plexo mioentérico. Estas células nerviosas regulan los movimientos peristálticos. En la corteza cerebral, sin embargo, la enzima está presente sólo en un 2 % de las neuronas. Fuera del cerebro, la óxido nítrico sintasa se encuentra en la capa endotelial de los vasos sanguíneos.



5. DISTRIBUCION DE LA OXIDO NITRICO SINTASA en este cerebro de rata: coincide con las regiones ligeramente coloreadas, que a su vez corresponden al bulbo olfatorio, al cuerpo estriado (la región más afectada en la enfermedad de Huntington).

Las localizaciones que nosotros hemos observado son extraordinarias, por cuanto la óxido nítrico sintasa prefería sobre todo las neuronas. Las funciones del óxido nítrico en las células nerviosas deben ser comparables en importancia a las que realiza en macrófagos y vasos sanguíneos, si no es que superan esa trascendencia.

Aunque de manera satisfactoria hemos podido seguir la pista del óxido nítrico por todo el cerebro, nuestros hallazgos no sugieren de manera inmediata ninguna función clara para este compuesto. Las localizaciones parecían ser algo misteriosas porque no coincidían con la localización de ninguno de los neurotransmisores conocidos. Pero pronto se consiguió abrir una brecha cuando observamos que la localización peculiar de la óxido nítrico sintasa en la corteza cerebral remedaba otro patrón peculiar de neuronas, que se teñían por cierto colorante.

El colorante en cuestión lo había desarrollado el histoquímico británico Anthony Pearse, de la Universidad de Londres, a mediados de los años sesenta. Cuando Pearse tiñó los cortes de cerebro con el colorante azul de nitrotetrazolio, observó que determinadas neuronas se tornaban azules al añadirles un cofactor enzimático, la nicotinamida adenina dinucleótido fosfato reducida (NADPH). Estas neuronas, a las que se da el nombre de neuronas diaforásicas, constituyen alrededor del 2 % de la corteza cerebral. El NADPH cede electrones en reacciones catalizadas por enzimas oxidativas, por cuya razón se supuso que la diaforasa intervendría en alguna forma de oxidación.

Muy pocos investigadores, sin embargo, prestaron atención al colorante. A mediados de los años ochenta, M. Flinth Beal y Joseph B. Martin, del Hospital General de Massachusetts, observaron que las neuronas teñidas por este colorante oponían una resistencia selectiva a la pérdida neurodegenerativa asociada con distintas enfermedades. En la enfermedad de Huntington hasta un 95 % de las neuronas del área conocida con el nombre de núcleo caudado degeneran, sin que se pierda casi ninguna de las neuronas en las que está presente la diaforasa. En las zonas afectadas por un accidente cerebrovascular y en algunas regiones del cerebro implicadas en la enfermedad de Alzheimer, las neuronas diaforásicas son de igual modo resistentes. La destrucción neurotóxica de neuronas por NMDA en un cultivo, un modelo experimental del accidente cerebrovascular, puede afectar hasta el 90 % de las neuronas, sin que se afecten en absoluto las neuronas diaforásicas.

Los investigadores andan perplejos ante cuál pueda ser la razón por la que sobreviven las neuronas diaforásicas frente a estos insultos neurotóxicos. El esclarecimiento de la cuestión arrojaría luz sobre el tratamiento a seguir en enfermedades neurológicas importantes (accidente cerebrovascular, enfermedad de Alzheimer y enfermedad de Huntington).

La coincidencia, recién descubierta, entre neuronas diaforásicas y neu-

OXIDO NITRICO SINTASA

TILYATETGKSQAYAKTLCEIFKHAFDAKAMSM··EEYDIVHLE·····HEALVLVVTSTFGNGDPPENGEKFGCALMEM

IVFYGSQTGTAEEFANRLSKD·AHRYGMRGMSADPEEYDLADLSSLPEIDKSLVVFCMATYGEGDPTDNAQDF·YDWLQ·

CITOCROMO P-450 REDUCTASA

FLAVINA MONONUCLEOTIDO

RHPNSVQEERKSYKVRFNSVSSYSDSRKSSGDGPDLRDNFESTGPLANVRFSVFGLGSRAYPHFCAFGHAVDTLLEELGG

··ETDVDLTGVKFAVFGLGNKTYEHFNAMGKYVDQRLEQLGA

ERILKMREGDELCGQEEAFRTWAKKVFKAACDVFCVG················DDVNIEKPNNSLISNDRSWKRNKFRLT

QRIFELGLGDDDGNLEEDFITWREQFWPAVCEFFGVEATGEESSIRQYELVVHEDMDVAKVYTGEMGRLKSYENQK··PP

PIROFOSFATO DE LA FLAVINA ADENINA DINUCLEOTIDO

YVAEAPDLTQGLSNVHKKRVSAARLLSRQNLQSPKFSRSTIFVRLHTNGNQELQYQPGDHLGVFPGNHEDLVNALIERLE

FDAKNPFLAAVTAN·RKLNQGTERHLMHLELD···ISDSKI············RYESGDHVAVYPANDSALVNQIGEIL·

DAPPANHVVKVEMLEERNTALGVISNWKDESRLPPCTIFQ·AFKYYLDITTPPTPLQLQQFASLATNEKEKQRLLVL···

·GADLDVIMSLNNLDEE·······SNKKH··PFPCPTTYRTALTYYLDITNPPRTNVLYELAQYASEPSEQEHLHKMASS

ISOALOXAZINA DE LA FLAVINA ADENINA DINUCLEOTIDO

·SKGLQEYEEWKWGKNPTMVEVLEEFPSIQMPATLLLTQLSLLQPRYYSISSSPDMYPDEVHLTVAIVSYHTRDGEGPVH

SGEGKELYLSWVVEARRHILAILQDYPSLRPPIDHLCELLPRLQARYYSIASSSKVHPNSVHICAVAVEYEAK··SGRVN

RIBOSA DE LA NICOTINAMIDA ADENINA DINUCLEOTIDO FOSFATO REDUCIDA

HGVCSSWLNRIQADD······VVPCFVRGAPSFHLPRNPQVPCILVGPGTGIAPFRSFWQQRQFDIQHKGMNPCPMVLVF

KGVATSWLRAKEPAGENGGRALVPMFVRKSQ·FRLPFKSTTPVIMVGPGTGIAPFMGFIQERAW·LREQGKEVGETLLYY

ADENINA DE LA NICOTINAMIDA ADENINA DINUCLEOTIDO FOSFATO REDUCIDA

GCRQSKIDHIYREETLQAKNKGVFRELYTAYSREPDRPKKYVQDVLQEQLAESVYRALKEQGGHIYVCGDV·TMAADVLK

GCRRSDEDYLYREELARFHKDGALTQLNVAFSREQAH·KVYVQHLLKRD·REHLWKLIHEGGAHIYVCGDARNMAKDVQN

AIQRIMTQQGKLSEEDAGVFISRLRDDNRYHEDIFG

TFYDIVAEFGPMEHTQAVDYVKKLMTKGRYSLDVWS

6. SECUENCIA DE AMINOACIDOS correspondientes a la NOS y a la citocromo P-450 reductasa y deducidas a partir de su ADN. Las coincidencias sugieren actividades comunes. Ambas poseen lugares de unión específicos para coenzimas comunes (*rectángulos rojos*). Las líneas indican que los aminoácidos coinciden; los dos puntos resaltan su estrecha semejanza.

ronas que contienen óxido nítrico sintasa ha sido una fuente de inspiración. Tras considerar la importancia de la posible relación entre el óxido nítrico y el NADPH, nos pusimos a trabajar inmediatamente junto con Hwang, Ted M. Dawson, neurólogo adscrito a nuestro laboratorio, y Majid Fotuhi, alumno de doctorado. No tardamos en demostrar que eran precisamente las mismas neuronas las que por tinción revelaban actividad de óxido nítrico sintasa como de diaforasa, y esto tanto en el cerebro como en los tejidos periféricos. Entendimos también por qué la actividad de la óxido nítrico sintasa justificaba la tinción de la diaforasa: el colorante acepta electrones procedentes de la arginina al oxidarse a óxido nítrico, produciéndose así el color azul.

Ese hallazgo, al mismo tiempo que nos animaba en nuestro trabajo, nos parecía ilógico. Estaba claro que algo relacionado con la síntesis del óxido nítrico hacía que las neuronas resistieran el daño neurotóxico. Y al mismo tiempo, que el óxido nítrico era el resultado de la actividad del glutamato, y que el glutamato era el responsable de la neurotoxicidad. El conocimiento del mecanismo molecular responsable de esa resistencia nos permitiría explicar esta paradoja y comprender por qué las neuronas carentes de óxido nítrico sintasa mueren con tanta facilidad en el ataque neurotóxico.

Un supuesto válido para resolver este problema sería el de que las neuronas que producen óxido nítrico lo liberan y que el óxido nítrico, por su toxicidad, mata las neuronas adyacentes. Nosotros sabíamos ya que, después de la estimulación por niveles moderados de glutamato, el óxido nítrico provoca la síntesis de GMP cíclico en las células nerviosas adyacentes. Pero quizás en presencia de niveles altos de glutamato, las neuronas productoras de NO se comporten como los macrófagos, es decir, que liberen cantidades letales de óxido nítrico. Si esta teoría es correcta, se podría esperar que, con los inhibidores de la óxido nítrico sintasa, no se presentase la neurotoxicidad.

Para examinar esa cuestión directamente, Valina L. Dawson y Edythe D. London, del Centro de Investigación sobre la Adicción en Baltimore, junto con Dawson y nosotros, analizamos la neurotoxicidad de NMDA en cultivos de neuronas de la corteza cerebral. En este modelo, desarrollado por Dennis W. Choi, entonces en Stanford, se añadía NMDA a los cultivos de células del cerebro de fetos de rata. Un día después de su exposición al NMDA durante sólo 5 minutos, hasta el 90 % de las neuronas habían muerto. Este modelo refleja la neurotoxicidad que tiene lugar en los accidentes cerebrovasculares.

En estos cultivos observamos que la nitroarginina, un inhibidor selectivo muy potente de la óxido nítrico sintasa, evita por completo la neurotoxicidad debida al NMDA. Al eliminar la arginina de la mezcla de incubación, las células quedan igualmente protegidas. Más aún, la hemoglobina, que liga el óxido nítrico y lo inactiva, inhibe también sus efectos tóxicos.

Así pues, el óxido nítrico es el responsable de la neurotoxicidad producida por el glutamato que actúa sobre los receptores de NMDA en los cultivos. Debido a que los antagonistas del NMDA pueden bloquear el daño inducido por el glutamato asociado con los accidentes cerebrovasculares, el óxido nítrico podría modular también la destrucción neuronal que se produce en esa situación.

Bernard Scatton y sus colaborado-

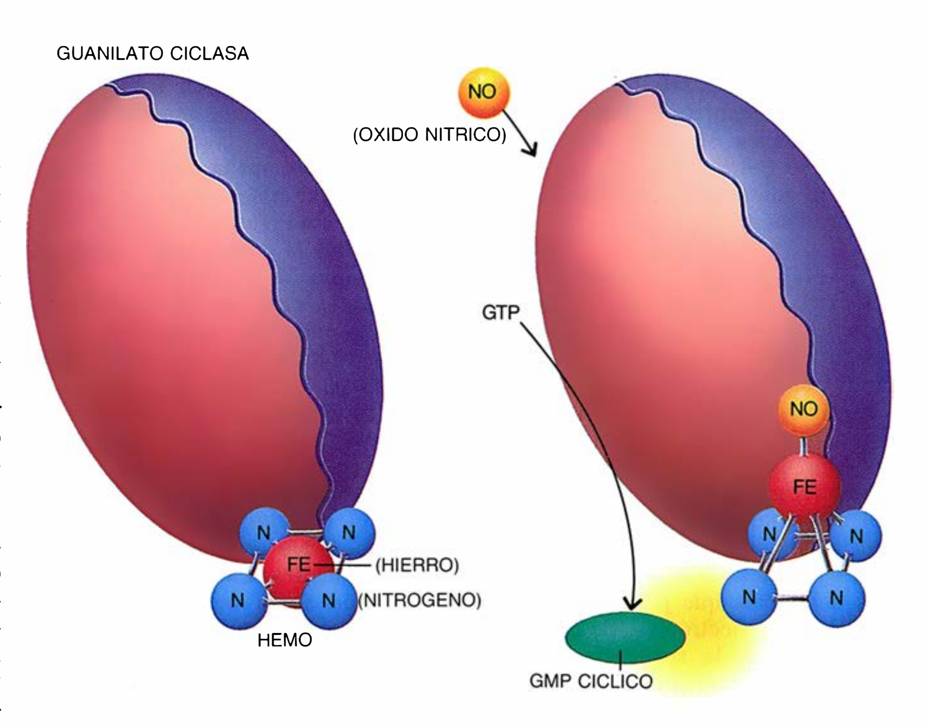
res, de Synthelabo en París, han inyectado pequeñas dosis de nitroarginina en ratones inmediatamente después de provocar un accidente cerebrovascular. La nitroarginina redujo el daño del accidente cerebrovascular en un 73 %; en un experimento paralelo, sin embargo, un potente antagonista del NMDA produjo sólo un 55 % de protección. Estos hallazgos sugieren que los inhibidores de la óxido nítrico sintasa pueden aportar un beneficio terapéutico en el accidente cerebrovascular y en el daño neurológico asociado con un exceso de liberación de glutamato.

No se ha esclarecido todavía la función precisa del óxido nítrico en las neuronas, aunque se ha avanzado bastante en esa línea. Se manejan datos diversos que indican que el óxido nítrico actúa de manera muy parecida a como lo hacen los neurotransmisores ya conocidos. En el intestino, por ejemplo, la relajación muscular relacionada con los movimientos peristálticos está mediada por el plexo mioentérico de los nervios.

Pero no sabemos todavía cuál puede ser el neurotransmisor responsable de esta relajación. Nuestra demostración de que la óxido nítrico sintasa está concentrada en estas neuronas sugería que el óxido nítrico podría ser el desconocido mensajero. Varios laboratorios han demostrado con posterioridad que la relajación normal del músculo producida por la estimulación eléctrica de las neuronas del plexo mioentérico puede bloquearse por los inhibidores de la óxido nítrico sintasa. Más aún, la adición directa de óxido nítrico al intestino imita los efectos de la estimulación nerviosa.

Si el óxido nítrico es un neurotransmisor, está resultando ser bastante atípico. Los neurotransmisores, por lo común compuestos estables, se almacenan en las vesículas sinápticas de las terminaciones nerviosas. Se liberan mediante un proceso en el que las vesículas sinápticas se funden con la membrana de la neurona. Al liberarse, se produce una interacción con las proteínas receptoras en la superficie externa de las membranas de las neuronas adyacentes.

Pero el óxido nítrico no se almacena en las vesículas. Junto con Marcello Costa, de la Universidad de Flinders, hemos utilizado la microscopía electrónica para visualizar la óxido nítrico sintasa en las neuronas del plexo mioentérico. Allí, la enzima se aloja en el citoplasma, no en las vesículas sinápticas. Por tanto, se



7. EL RECEPTOR DEL OXIDO NITRICO es el hierro en la enzima guanilato ciclasa (*izquierda*), que sintetiza el segundo mensajero, GMP cíclico. La unión del óxido nítrico (*derecha*) provoca un cambio conformacional del grupo hemo que contiene el hierro, lo que aumenta la producción de GMP cíclico a partir de GTP, un producto que presenta diversidad de funciones.

hace probable que el óxido nítrico se sintetice en la neurona en el momento en que se necesita. Su liberación depende, al parecer, de una simple difusión desde la terminación nerviosa. En vez de actuar sobre una proteína receptora de membrana, el óxido nítrico se difunde hasta una neurona adyacente. Su receptor es el hierro del centro activo de la enzima que sintetiza el GMP cíclico. Al enlazarse con el hierro, el óxido nítrico inicia un cambio tridimensional en la disposición espacial de la enzima que se torna más activa y, consiguientemente, aumenta la producción de GMP cíclico. Por este modo de acción tan peculiar, el óxido nítrico representa un tipo de mensajero neuronal totalmente nuevo.

El óxido nítrico puede hallarse también implicado en los cambios que subyacen en el aprendizaje y la memoria. La mayoría de los investigadores piensan que la memoria implica aumentos o descensos prolongados en la transmisión a través de ciertas sinapsis después de la estimulación repetitiva de neuronas. En conformidad con esa idea, en la potenciación a largo plazo (PLP) y la depresión a largo plazo, entre otros modelos, se estimulan repetitivamente neuronas particulares; después, detectan aumentos o descensos persistentes en la transmisión sináptica.

Los investigadores han examinado el papel de la óxido nítrico sintasa en estos procesos prolongados. Eric R. Kandel y su grupo, de la Universidad de Columbia, el equipo de Daniel Madison, de Stanford, y el de Georg Böhme, de Rhône-Poulenc Rorer, han estudiado, cada uno por su cuenta, los efectos de los inhibidores de la óxido nítrico sintasa. Han determinado el efecto de los inhibidores sobre la PLP en el hipocampo, una región del cerebro que se sabe que está implicada en la memoria. Todos llegaron a la conclusión de que los inhibidores bloqueaban la PLP. Además, Katsuei Shibuki y Daisuke Okada, del Laboratorio de Redes Nerviosas en Japón, demostraron esa inhibición en el cerebelo.

Una pregunta lógica que debemos hacernos ahora es si el óxido nítrico no será tal vez el primer representante de una familia de nuevos mensajeros neuronales. Algunas indicaciones sobre esta posibilidad proceden de nuestros experimentos de clonación de la óxido nítrico sintasa. En esa tarea hemos contado con la ayuda de Hwang, Charles E. Glatt y Charles Lowenstein en nuestro laboratorio y con la colaboración de Randall R. Reed, del Instituto Médico Howard Hughes de la Hopkins.

Una vez establecida la secuencia de los aminoácidos, la comparamos con las de todas las proteínas conocidas. Y comprobamos que sólo había semejanzas con una enzima co-

nocida de mamíferos: la citocromo P-450 reductasa. Hallazgo que no dejó de sorprendernos, habida cuenta de que nunca se había asociado la citocromo P-450 reductasa con el cerebro ni con ninguna función de neurotransmisión.

Sí se sabía que esta enzima actuaba como donador de un electrón para las enzimas hepáticas que contienen P-450. Las enzimas vinculadas con el P-450 metabolizan una amplia variedad de fármacos y en algunos organismos se ponen en marcha ante las dioxinas y ciertos hidrocarburos aromáticos, entre otros contaminantes del ambiente. La función de transferencia de electrones de la citocromo P-450 reductasa está mediada por tres cofactores que participan en esa canalización electrónica. Se comprende, pues, que la secuencia de aminoácidos en la enzima tenga lugares de reconocimiento para cada uno de esos tres cofactores: NADPH, flavina adenina dinucleótido y flavina mononucleótido.

Llama la atención el que la óxido nítrico sintasa posea lugares de reconocimiento para esos mismos tres cofactores. Más aún, esos lugares están ubicados en los mismos sitios donde se encuentran en la citocromo P-450 reductasa. Existe notable similaridad en el conjunto de las secuencias de aminoácidos de las dos enzimas.

Pero la óxido nítrico sintasa posee otros sitios de engarce de los que carece la citocromo P-450 reductasa. Tiene un sitio para la calmodulina y otro para la fosforilación. (La fosforilación implica la adición de grupos fosfato a proteínas por una familia de enzimas que reciben el nombre de proteína quinasas.) El trabajo de Paul Greengard, de la Universidad de Rockefeller, y el de otros muchos, sirvió para establecer que la fosforilación de proteínas transmite información procedente de segundos mensajeros, tales como el AMP cíclico, a varias proteínas del interior de las células. La fosforilación es uno de los principales mecanismos de señalización del interior de las células. Nosotros habíamos ya advertido que la óxido nítrico sintasa podría fosforilarse por una proteína quinasa dependiente de AMP cíclico, una proteína quinasa dependiente de calcio-calmodulina y una proteína quinasa C. Estas quinasas son importantes enzimas fosforilantes que regulan la respuesta celular a hormonas, neurotransmisores y factores de crecimiento.

Al presentar la óxido nítrico sintasa tantos lugares de regulación, es lógico que influyan sobre ella muchos más factores que los que suelen afectar a otras enzimas. Esta capacidad de respuesta tiene sentido, si consideramos el papel crucial que el óxido nítrico desempeña proporcionando una modulación sutil a procesos muy diversos. Esta función parece contrastar con el papel más ordinario que desempeña la citocromo P-450 reductasa, a pesar de las muchas semejanzas entre sus secuencias.

¿Qué podrían tener en común estas dos enzimas? Además de regular enzimas metabolizantes de fármacos, la citocromo P-450 reductasa cumple la misión de ceder electrones a la enzima hemooxigenasa, que degrada el hemo, el constituyente que contiene el hierro y que transporta el oxígeno en los hematíes. La forma mejor caracterizada de la hemooxigenasa, la número uno, se concentra en el bazo, donde normalmente se degradan los hematíes. Pero otra forma menos comprendida de la enzima, la número dos, está presente en niveles elevados en el cerebro. Al solaparse de manera tan regular la presencia de la hemooxigenasa número dos con la presencia de la citocromo P-450 reductasa, parece probable que la transferencia de electrones a la hemooxigenasa número dos sea una de las funciones principales de la citocromo P-450 reductasa.

El examen atento de este proceso de transferencia de electrones evidencia algo que nos pone en la pista del que podría resultar ser el segundo de una nueva clase de mensajeros neuronales. Durante este proceso, la hemooxigenasa libera monóxido de carbono. Todos sabemos que se trata de un gas tóxico emitido por el tubo de escape de los coches. Se une a la hemoglobina y obstaculiza su actividad transportadora de oxígeno. Pero el monóxido de carbono es también un compuesto normal del organismo. Al ligarse al hemo de la guanilato ciclasa, la enzima que produce el segundo mensajero, el GMP cíclico, estimula la formación de GMP cíclico, de la misma manera que lo hace el óxido nítrico.

Ajay Verma, alumno de doctorado de nuestro laboratorio, sugirió que el monóxido de carbono era un excelente candidato para actuar como un mensajero neuronal. Con su compañero universitario David Hirsch, ha acumulado una gran cantidad de datos que apoyan esa idea. Verma y Hirsch han demostrado que el ARN mensajero de la hemooxigenasa número dos se localiza en poblaciones de neuronas que reflejan muy de cerca la distribución de la citocromo P-450 reductasa y de la guanilato ciclasa.

Estos hallazgos son congruentes con la posibilidad de que el monóxido de carbono sea el regulador principal del GMP cíclico en el cerebro. Cuando Verma y Hirsch trataron los cultivos de neuronas de cerebro con un inhibidor de la hemooxigenasa, los niveles de GMP cíclico cayeron en picado, pero los inhibidores de la óxido nítrico sintasa no tuvieron efecto alguno. Así pues, parece ser que es el monóxido de carbono el que normalmente mantiene los niveles de GMP cíclico en algunas de las regiones del cerebro. La semejanza estructural de la óxido nítrico sintasa y de la citocromo P-450 reductasa podría ser un exponente de sus funciones paralelas en la síntesis de los dos mensajeros hermanos: el monóxido de carbono y el óxido nítrico. Aunque los dos compuestos se hallan en regiones diferentes del cerebro y parezcan estar implicados en vías distintas, sus modos de acción se parecen muchísimo. El tiempo dirá si el monóxido de carbono constituye o no un miembro más de un nuevo grupo de neurotransmisores. Lo que sí está claro es que el óxido nítrico es una molécula mensajera nueva de una importancia extraordinaria. Este compuesto, con su pequeñez, su vida tan efímera y su extraño comportamiento, se nos presenta como un serio competidor para ocupar un puesto de privilegio entre los neurotransmisores principales hasta ahora conocidos.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE OBLIGATORY ROLE OF ENDOTHELIAL CELLS IN THE RELAXATION OF ARTERIAL SMOOTH MUSCLE BY ACETYLCHOLINE. Robert F. Furchgott y John V. Zawadzki en *Nature*, vol. 288, n.º 5789 págs. 373-376; 27 de noviembre de 1980.

NITRIC OXIDE FROM L-ARGININE: A BIOREGULATORY SYSTEM. Dirigido por S. Moncada y E. S. Higgs. Excerpta Medica, 1990.

CLONEDAND EXPRESSED NITRIC OXIDE SYNTHASE STRUCTURALLY RESEMBLES CYTOCHROME P-450 REDUCTASE. David S. Bredt, Paul M. Hwang, Charles E. Glatt, Charles Lowenstein, Randall R. Reed y Solomon H. Snyder en *Nature*, vol. 351, n.º 6392, págs. 714-718; 27 de junio de 1991.

NITRIC OXIDE: PHYSIOLOGY, PATHOPHYSIOLOGY AND PHARMACOLOGY. S. Moncada, R. M. J. Palmer y E. A. Higgs en *Pharmacological Reviews*, vol. 43, n.º 2, págs. 109-142; junio de 1991.

NITRIC OXIDE: A NOVEL NEURONAL MESSENGER. D. S. Bredt y S. H. Snyder en *Neuron*, vol. 8, n.º 1-20, págs. 8-11; enero de 1992.

Nebulosas planetarias

Estas nubes fluorescentes de gas representan el último destello de estrellas moribundas semejantes al Sol y sirven de ayuda a los astrónomos para comprender la evolución estelar e incluso el destino último del universo

Noam Soker

Igual que las personas, también las estrellas envejecen y mueren. Las de mayor masa viven por breves períodos y acaban en brillantes explosiones de supernovas. Las estrellas de masa intermedia, como el Sol, mucho más corrientes, expiran con más elegancia: cuando agotan su combustible termonuclear, se hinchan y, en un espasmo final, expulsan su materia más externa creando una nube de gas esférica en expansión. El pequeño e incandescente residuo central de la estrella calienta el gas y lo hace resplandecer. Durante algunos miles de años, rodea a la estrella moribunda una nube resplandeciente, misteriosa y bella, que recibe el nombre de nebulosa planetaria.

Estas nebulosas exhiben un espectacular abanico de formas, tamaños y estructuras, ofreciendo en tal diversidad fascinantes pistas sobre la naturaleza de la evolución estelar y sobre los modos infinitos en que las estrellas interaccionan con sus entornos. Por ejemplo, dado que algunos de los elementos pesados (como el carbono, el nitrógeno y el oxígeno) formados en el núcleo de una estrella emigran hacia sus capas más exteriores, la abundancia de estos elementos en una nebulosa planetaria puede revelar cómo se mezcla el material entre las distintas partes del interior de una estrella. La nebulosa en expansión se funde con el medio interestelar —el gas que llena el espacio existente entre las estrellas— y lo enriquece con estos elementos pesados. Este es el proceso principal del regreso, al espacio, de la materia de las estrellas.

En los últimos años los astrónomos han empezado también a utilizar las nebulosas planetarias, brillantes y relativamente fáciles de identificar, para perfeccionar las mediciones de las distancias de las galaxias remotas. Tales cálculos ayudan a los cosmólogos a determinar la edad y el destino último del universo.

Las nebulosas planetarias no se distinguen a simple vista. En realidad, el estudio de estos objetos no se acometió de veras hasta mucho después de la invención del telescopio. Las observaciones hasta ahora realizadas se han visto dificultadas por el muy escaso brillo superficial que estos objetos presentan, de tal manera que tienden a confundirse en el fondo del cielo. Así, por ejemplo, la luz de la nebulosa Hélice (NGC 7293) se extiende sobre una zona tan grande como la ocupada por la luna llena.

En el decenio de 1780 el gran astrónomo inglés William Herschel emprendió una detallada investigación y catalogación de las nebulosas, manchas de luz desvaídas que no parecían estrellas. En un trabajo publicado en 1785 acuñó la expresión "nebulosa planetaria" para describir una clase de objetos cuyas formas redondeadas sugerían fantasmales versiones de las imágenes de los planetas. (La lista de Herschel se amplió más adelante hasta convertirse en el Nuevo Catálogo General, o NGC por sus siglas en inglés; en la actualidad, las nebulosas planetarias suelen designarse por su número de NGC.) Herschel supuso erróneamente que las nebulosas planetarias representaban objetos jóvenes, sin condensarse todavía en estrellas.

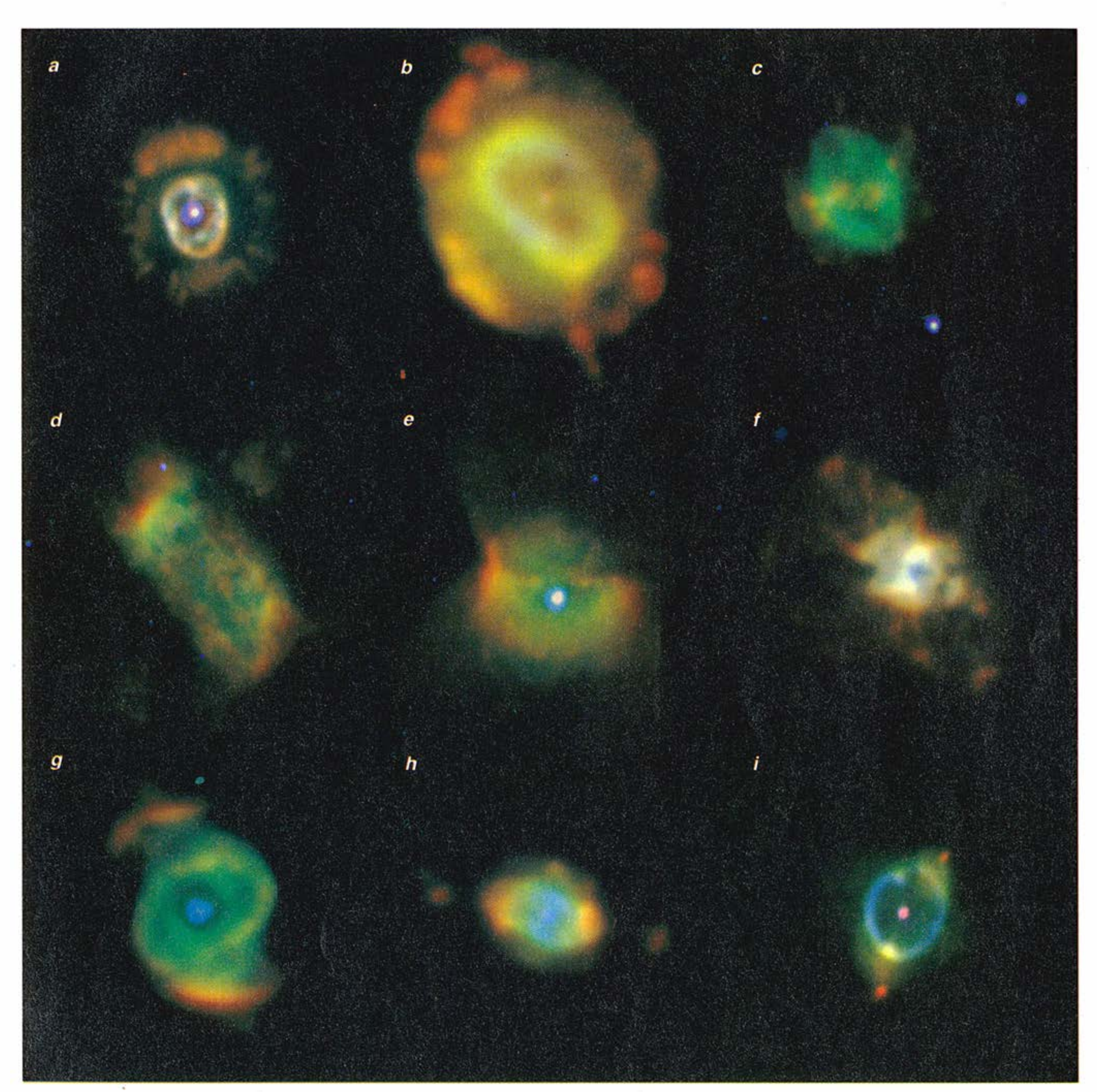
De los tiempos de Herschel acá, el número de nebulosas planetarias catalogadas ha aumentado desde un corto número hasta más de 1600, solamente en nuestra galaxia (el número total puede ser 20 veces mayor). Más importante todavía es lo mucho que han aprendido los astrónomos acerca de la verdadera naturaleza de las nebulosas planetarias por medio de la espectroscopía, técnica en la cual la radiación emitida por un objeto se dispersa para un examen particularizado por longitudes de onda o colores. Cada elemento emite y absorbe radiación a ciertas longitudes de onda, representadas por líneas o rayas espectrales características; además, tales longitudes de onda se acortan cuando el objeto radiante avanza hacia el observador, y se alargan cuando se aleja del mismo. Este efecto de apariencia sencilla, denominado corrimiento Doppler, ha proporcionado una información muy abundante acerca de la estructura y la dinámica de las nebulosas planetarias.

A comienzos del siglo XX, los astrónomos descubrieron que las rayas espectrales de las nebulosas planetarias presentan una forma en doble cresta característica, indicativa de que tales objetos se encuentran en expansión. La radiación del lado de la nebulosa que se acerca se ha desplazado a una longitud de onda ligeramente menor, mientras que la del lado que se aleja se desplaza a una longitud de onda mayor. Evidentemente, estos objetos no son nubes que colapsen para formar estrellas nuevas, sino materia expulsada por estrellas envejecidas. En 1956, el astrofísico soviético Iosif S. Shklovsky sentó la moderna hipótesis de que las nebulosas se desarrollan a partir de las capas exteriores desechadas por estrellas gigantes rojas envejecidas, con lo que no representan el comienzo, sino el fin del ciclo vital de una estrella.

NOAM SOKER ha estudiado profundamente la estructura y la evolución de las nebulosas planetarias, extendiendo sus investigaciones a las interacciones entre estrellas binarias y gas caliente en los cúmulos de galaxias. Nacido y educado en un kibbutz, Soker se doctoró en física en el Instituto de Tecnología Technion de Israel, en 1986, trasladándose seguidamente a la Universidad de Virginia. Desde 1989, trabaja en el Centro Smithsoniano de Astrofísica en Harvard, y en el próximo otoño pasará a dar clases de física en la Universidad de Haifa.

Numerosas observaciones han demostrado que las nebulosas planetarias se expanden a velocidades que van de cinco a 100 kilómetros por segundo; su ritmo medio de expansión es de unos 20 kilómetros por segundo. En algunos casos, es posible comprobar estas cifras por el examen visual del crecimiento de la nebulosa. Estimando el tamaño de la nebulosa y el ritmo de decrecimiento de su expansión, puede calcularse su edad. Se han obtenido así valores que van desde pocos miles hasta 30.000 años, lo cual ha servido para acotar modelos de la evolución de las nebulosas planetarias y de sus estrellas centrales.

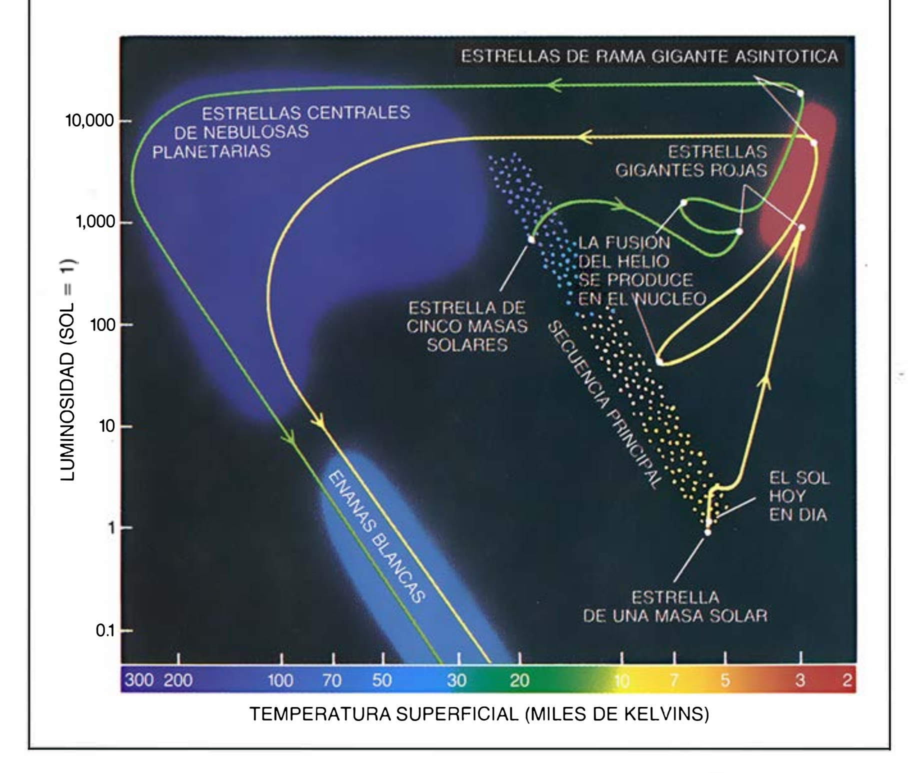
Los investigadores que analizan las rayas desplazadas por efecto Doppler han descubierto además que, en muchas nebulosas planetarias, surgen de las estrellas centrales corrientes de gas de alta velocidad. Estos vientos estelares, así se les llama, producen un patrón espectral característico, debido a que los átomos pueden absorber radiación a la misma longitud de onda en la que la emiten. Los átomos situados a lo largo de la línea visual dirigida a la estrella absorben parte de su luz antes de que llegue a la Tierra, provocando una raya oscura (absorción) en el espectro de la estrella. Como estos átomos pertenecen a la parte del



1. SE FORMA UNA NEBULOSA PLANETARIA cuando una estrella envejecida y de masa parecida a la que posee el Sol se expande y expulsa sus capas exteriores. La radiación de un caliente remanente estelar ilumina el gas circundante. Las nebulosas redondeadas, tal como la NGC 2392 (*a*), son la excepción; abundan más las elípticas, como la NGC 7662 (*b*) y 7354 (*c*). Las NGC 650-1 (*d*), 2346 (*e*) y 2440 (*f*) presentan complejas formas de mariposa; la NGC 6543 (*g*) desafía cualquier clasificación. Algunas nebulosas, como las NGC 7009 (*h*) y 3242 (*i*), están rodeadas por manchas brillantes. En estas imágenes la emisión del oxígeno ionizado se indica en verde, la del nitrógeno en rojo y la del helio en azul. El elemento fotoemisor dominante en cada región depende de la temperatura local, la densidad y la cantidad de radiación recibida.

Ciclo vital de las estrellas de tipo solar

La evolución estelar queda representada en este diagrama de la luminosidad en función de la temperatura superficial. Las líneas siguen las trayectorias evolutivas de dos estrellas, una de ellas de masa solar y la otra con el quíntuplo de esa masa. Alrededor del 90 % de la vida de estas estrellas transcurre en una banda estable, denominada secuencia principal. Las estrellas dotadas de gran masa evolucionan más deprisa que las ligeras, y cuando se agota su combustible de hidrógeno central, unas y otras estrellas se expanden y enfrían, pasando de la secuencia principal a convertirse en gigantes rojas. Entonces el helio comienza a fusionarse y las estrellas se contraen con rapidez. Una vez consumido todo el helio del núcleo, las estrellas se expanden hasta transformarse en estrellas de rama gigante asintótica. Tales estrellas crecen hasta la inestabilidad y se desprenden por completo de sus capas exteriores antes de 100.000 años. Al contraerse y calentarse más los núcleos remanentes, su radiación hace que el gas circundante resplandezca, creando las nebulosas planetarias. Cuando su combustible se agota, las estrellas empiezan a enfriarse, y al cabo de 10.000 o 30.000 años ya no pueden iluminar la nebulosa en expansión. Las estrellas, ahora desnudas, pasan el resto de sus días constituidas en enanas blancas, remanentes estelares de extrema densidad.



viento que avanza hacia la Tierra, la citada raya está desplazada hacia una longitud de onda más corta. Se comprueba que otros átomos no interpuestos en la línea visual de la estrella central emiten radiación en vez de absorberla; dichos átomos emisores se mueven en todas las direcciones, por lo que no producen ningún efecto Doppler global.

En consecuencia, el espectro de la estrella presenta una raya de emisión además de una raya de absorción cuya longitud de onda es ligeramente menor. La longitud de onda a la que aparece la línea de absorción indica la velocidad del flujo emitido. Los observadores han medido vientos estelares que avanzan a velocidades de hasta 4000 kilómetros por segundo. Las intensidades de las rayas de absorción y de emisión pueden utilizarse para deducir la densidad del viento y, con ello, el ritmo de pérdida de masa de la estrella, si bien este método todavía adolece de gran imprecisión.

Los análisis espectroscópicos han revelado también la composición de las nebulosas planetarias. Todo átomo produce un patrón característico de rayas espectrales que pueden examinarse y compararse con las observadas en un laboratorio. Las nebulosas planetarias, sin embargo, al principio se resistieron a este examen. En efecto, el astrónomo británico William Huggins descubrió en 1866 que muchas nebulosas radiaban con gran intensidad en tres rayas espectrales determinadas, y que dos de esas rayas no correspondían a ningún cuerpo conocido, por lo cual las atribuyó a un nuevo elemento hipotético que lógicamente denominó nebulio. En 1927, Ira S. Bowen, del Instituto de Tecnología de California, cayó por fin en la cuenta de que las misteriosas rayas espectrales realmente eran emitidas por iones de oxígeno, es decir, átomos despojados de algunos de sus electrones; en concreto, identificó el ion radiante como oxígeno doblemente ionizado (átomos que han perdido dos electrones), el cual es sumamente inestable en la Tierra pero puede persistir mucho tiempo en el extremado vacío que reina en el espacio.

La longitud de onda de las rayas de emisión identifica inequívocamente tanto el elemento como el número de electrones que le faltan, lo cual define el estado de ionización. Casi toda la radiación de las nebulosas planetarias es emitida por iones, bien cuando éstos son excitados por colisiones o por otra radiación de la estrella caliente, o bien cuando recapturan electrones libres. Lawrence H. Aller, de la Universidad de California en Los Angeles, James B. Kaler, de la Universidad de Illinois, y otros muchos han examinado las rayas de emisión a fin de determinar la concentración de átomos de las nebulosas planetarias, valiéndose tanto de telescopios ópticos como del satélite *Explorador Internacional en el Ultravioleta* que lleva funcionando desde 1978.

Las nebulosas planetarias contienen alrededor del 70 % de hidrógeno y el 28 % de helio en peso. Del 2 % restante, los elementos más comunes son carbono, nitrógeno y oxígeno. También aparecen otros elementos pesados, como neón, azufre, sodio, argón y cloro, en concentraciones aún más bajas.

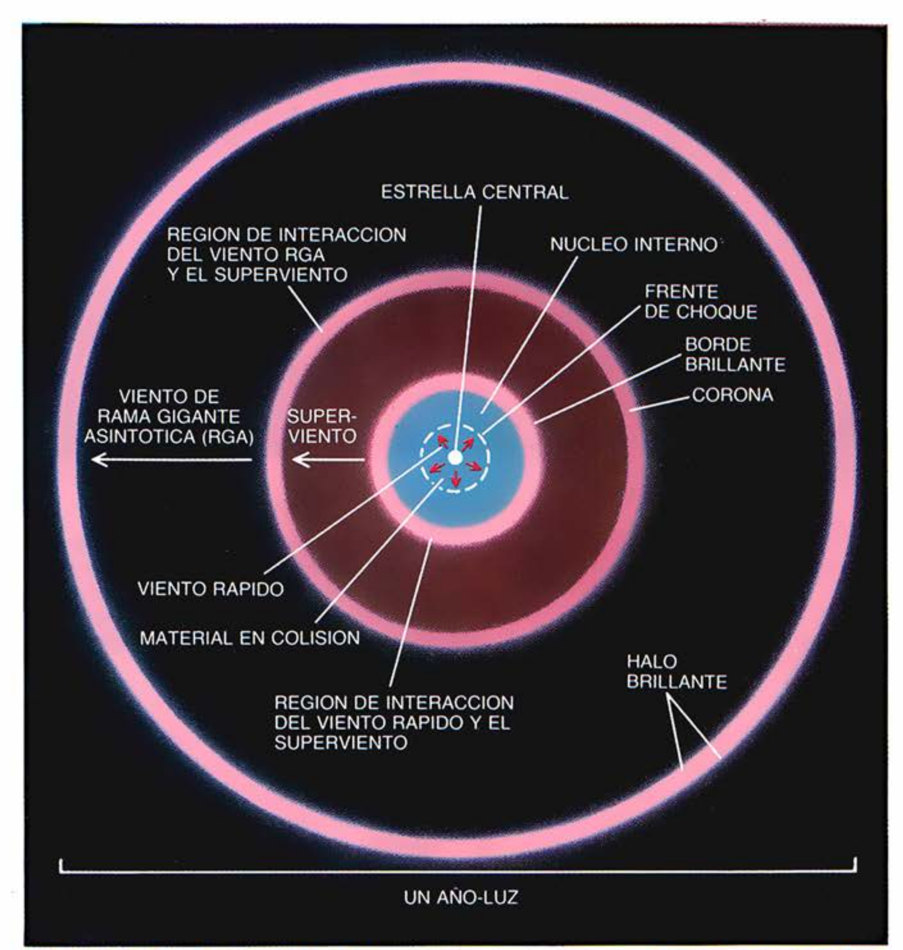
Se cree que muchos de estos elementos se sintetizaron en las reacciones termonucleares producidas en los centros de las estrellas. Su presencia en la nebulosa sugiere que fueron transportados al exterior del núcleo estelar. Las nebulosas planetarias no muestran señales de procesos violentos, por lo que este material debe haberse desplazado por convección, un fenómeno de transporte de materia y de energía originado por la

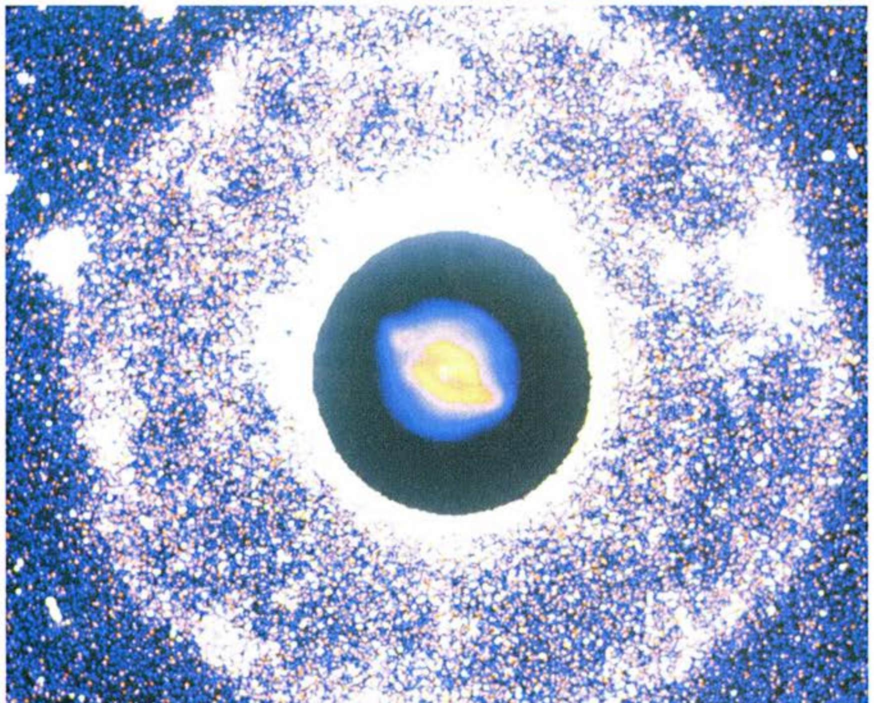
turbulencia en la estrella. La relativa abundancia de elementos pesados en las nebulosas planetarias implica, por ejemplo, que fueron arrancados del núcleo rico en helio y transportados a las capas más exteriores de la estrella. Seguidamente, un denso viento emanante de la estrella arrastró hacia fuera dichas capas. Los análisis de la composición de las nebulosas planetarias revelan algunos de los procesos que se desarrollaron en la estrella progenitora, y en especial el éxito y la profundidad de la convección interna de la estrella.

Las intensidades de las distintas rayas espectrales denuncian incluso las temperaturas y las densidades de las nebulosas planetarias. Los astrónomos afirman que la temperatura media suele aproximarse a los 10.000 kelvins. La densidad varía desde algunos átomos hasta 100.000 átomos por centímetro cúbico al pasar del centro o de la periferia más externa a las regiones ramificadas, brillantes y comprimidas. Tales densidades son miles de veces más elevadas que la densidad general de la materia interestelar. (No obstante, consideradas por los patrones terrestres las nebulosas planetarias están enrarecidas en alto grado; un centímetro cúbico de aire al nivel del mar contiene unos 10^{19} átomos.) Las nebulosas más jóvenes, y por tanto más pequeñas, tienden a presentar densidades relativamente elevadas.

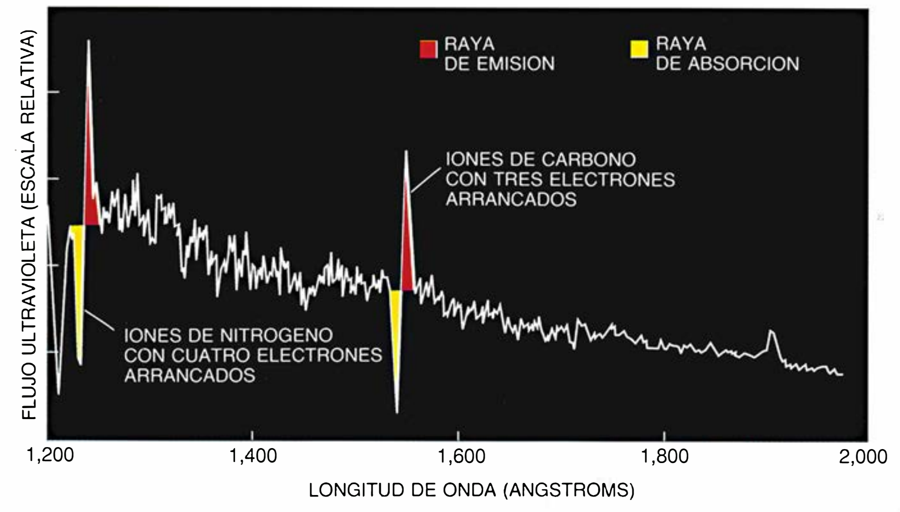
Los numerosos descubrimientos en la física de las nebulosas planetarias han ayudado a los teóricos a refinar sus ideas sobre la evolución estelar. Durante los dos últimos decenios, se han ideado refinadas simulaciones informáticas de modelos estelares por Bohdan Paczynski, actualmente en la Universidad de Princeton, y más tarde por Icko Iben, Jr., de la Universidad de Illinois, así como por Detlief Schünberner, de la Universidad de Kiel, y otros muchos. Gracias a tales simulaciones, los astrónomos han podido componer un guión coherente de las etapas evolutivas que conducen a la formación de las nebulosas planetarias.

Alrededor del 90 % de la vida de una estrella se dedica a la producción permanente de energía en su núcleo mediante la fusión nuclear: los núcleos de hidrógeno se fusionan entre sí para formar núcleos de helio, liberando energía. Durante esta etapa estable, se dice que la estrella es un objeto de la "secuencia principal"; afortunadamente para la vida en la Tierra, el Sol se encuentra en





2. ESQUEMA DE UNA NEBULOSA PLANETARIA (*arriba*), donde se evidencia una región interior de gas perturbada por un viento rápido que proviene de la estrella central. En la zona de colisión del viento rápido con el superviento, más denso pero más lento, se forma un borde brillante. A distancias mayores, el superviento interacciona con materia anteriormente expulsada en la evolución de la estrella, creando una corona. El viento RGA (Rama Gigante Asintótica), más antiguo, que ha tenido más tiempo para alejarse de la estrella, puede comprimir la materia interestelar situada adelante, dando lugar a un halo ramificado brillante. Una imagen de la NGC 6826 (*abajo*) exhibe muchas de estas características.



3. ESPECTRO ULTRAVIOLETA de la nebulosa planetaria NGC 6826. Registra la radiación emitida por iones (*crestas*) del viento rápido y absorbida por aquellos iones (*pozos*) que se mueven hacia la Tierra y se ven en silueta sobre el fondo de la estrella central. La longitud de onda y la intensidad de las apariciones espectrales observadas indican que el viento se mueve a 2000 kilómetros por segundo y arrastra aproximadamente una diezmillonésima de masa solar al año.

tal estado. El tiempo de permanencia de una estrella en la secuencia principal depende estrechamente de su masa. Las estrellas pesadas brillan más y consumen su combustible de hidrógeno más deprisa que las ligeras. Una estrella de una masa solar pasa unos diez mil millones de años en secuencia principal; en cambio, aquellas cuya masa quintuplica ese valor sólo pasan 60 millones de años en dicha fase.

A medida que una estrella envejece, el helio se acumula en su centro. Cuando se ha consumido todo el hidrógeno, el núcleo de helio se contrae bajo su propia gravedad y se vuelve más caliente. La fusión se propaga hacia fuera, hasta una capa que rodea el núcleo y que todavía contiene material rico en hidrógeno. Durante esta fase la estrella se expande hasta varias decenas de veces el diámetro del Sol (aproximadamente 1,4 millones de kilómetros). Su superficie, ahora muy alejada de la fuente de energía central, se enfría y brilla sólo al rojo vivo; sin embargo, su luminosidad total se centuplica. Llegada a esta etapa evolutiva, la estrella se ha convertido en gigante roja.

La fusión de hidrógeno en la capa mencionada continúa depositando cenizas de helio en el núcleo, que sigue calentándose y acumulando masa. Cuando la temperatura del núcleo alcanza unos 100 millones de kelvins, los núcleos de helio empiezan a fusionarse entre sí, formando núcleos de carbono y de oxígeno. Entre tanto, las partes más exteriores de la estrella se contraen, haciendo que su superficie se torne más caliente y azulada. Finalmente, el helio del centro se agota. A medida que la fuente de energía central mengua, vuelven a predominar las fuerzas gravitatorias, y, en consecuencia, el núcleo se contrae y aumenta su temperatura y densidad. La fusión del helio se traslada entonces a otra capa. La estructura del interior de la estrella se asemeja a una cebolla: una capa exterior de fusión de hidrógeno y una interior de fusión de helio rodean un núcleo inerte de carbono y oxígeno.

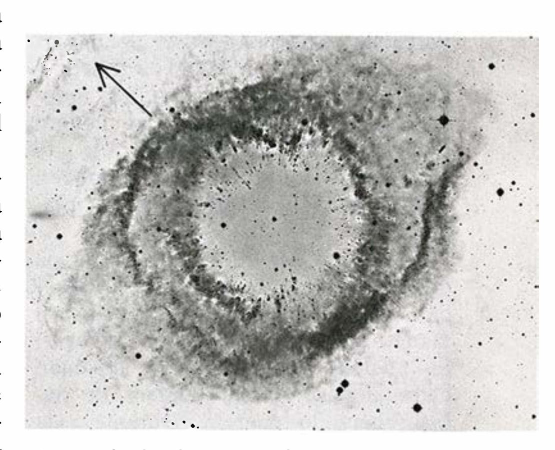
Tras la formación de la capa de helio, la estrella se hincha hasta adquirir varios centenares de veces el diámetro del Sol, convirtiéndose en estrella de la rama gigante asintótica. Fuera del núcleo denso se extiende un recubrimiento gaseoso, enorme y tenue, la parte distendida más exterior de la estrella. A causa de la tremenda expansión, su temperatura superficial desciende hasta unos 3000 kelvins; la superficie del Sol se halla a 6000 kelvins.

Como la siguiente etapa de la evolución estelar avanza con extremada rapidez, aún no se conoce bien la sucesión exacta de los acontecimientos. Una estrella de rama gigante asintótica genera un intenso viento que arrastra su envoltura más externa; está perfectamente probada la existencia de tales vientos, aunque el mecanismo preciso que los gobierna sea todavía un misterio. El elevado ritmo de pérdida de masa probablemente tenga que ver con las notables oscilaciones en radio, temperatura y luminosidad que presentan las estrellas de este tipo. Precisamente por sus fuertes cambios de brillo a menudo se las denomina variables Mira, nombre tomado de la brillante estrella pulsante Mira cuyo comportamiento tipifica la clase.

Incluso durante la secuencia principal las estrellas pierden algo de materia. Ahora bien, una estrella como el Sol pierde al año sólo una diezbillonésima parte (10^{-13}) de su masa en forma de viento solar que circula hacia afuera a una velocidad del orden de 600 kilómetros por segundo. En cambio, cuando la estrella se convierte en objeto de la rama gigante asintótica, la tasa de pérdida de masa anual crece hasta aproximadamente una millonésima (10^{-6}) de masa solar.

En sus últimas etapas tales estrellas generan un flujo aún más intenso, denominado superviento, que arrastra hasta una diezmilésima de masa solar al año. La mayor parte de la envoltura exterior restante de la estrella es succionada en forma de superviento. Las estrellas de la rama gigante asintótica son tan grandes que sus capas más exteriores sólo están retenidas débilmente por la gravedad del núcleo denso, y el gas no necesita moverse a velocidades impresionantes para escapar de la estrella. Los supervientos avanzan, pues, hacia el exterior a unos modestos 10 a 20 kilómetros por segundo.

Hacia 1980, varios teóricos, entre ellos Amos Harpaz y Attay Kovetz, de la Universidad de Tel-Aviv, confeccionaron un modelo cuantitativo detallado de la transformación de las estrellas gigantes rojas en nebulosas planetarias. Una vez liberada la estrella de la mayor parte de su envoltura más exterior, el superviento amaina. De la estrella original sola-



4. PLACAS ESTELARES que revelan la intrincada estructura de la nebulosa Hélice. La región más interna, elíptica y moteada (*izquierda*), refleja el flujo irre-

mente queda un núcleo caliente y desnudo. Este remanente estelar se contrae y adquiere todavía más calor, potenciado por la fusión del escaso hidrógeno que le queda. Pese a todos los cambios, el brillo de la estrella se mantiene constante en varios miles de veces la luminosidad del Sol. Es notable que la masa de la estrella remanente sea aproximadamente 0,6 veces la del Sol, con casi total independencia de la masa inicial del objeto, la que tenía en la secuencia principal.

La nube de gas que rodea la estrella se enfría a medida que se expande. Cuando la temperatura cae por debajo de unos 1000 kelvins empiezan a unirse por fusión granos de polvo compuestos de carbono, oxígeno, silicio y otros elementos pesados, con diámetros comprendidos entre una milésima y una diezmilésima de milímetro. El polvo oscurece la estrella al absorber la mayor parte de la radiación visible y reemitirla en forma de radiación infrarroja, menos energética y de más larga longitud de onda. Aunque invisibles para los telescopios ópticos, tales nebulosas protoplanetarias han podido observarse con detectores de infrarrojos instalados en la Tierra y, en 1983, mediante el *Satélite Astronómico de Infrarrojos*.

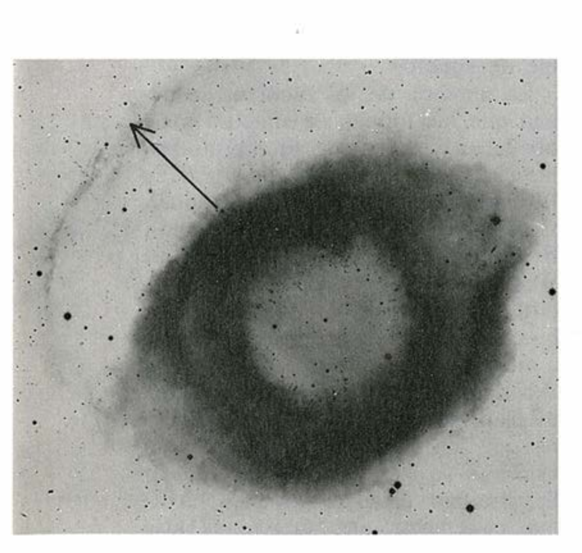
Transcurridos de centenares a millares de años desde el final del superviento, la superficie de la estrella central en contracción se ha calentado hasta una temperatura de 25.000 kelvins. Por entonces la radiación de la estrella es tan energética, que arranca los electrones de los átomos de la nebulosa. Por esta razón está ionizado casi todo el gas observado en las nebulosas planetarias. Cuando los iones colisionan o se combinan con electrones liberados, emiten brillantes rayas espectrales, principalmente en longitudes de onda ópticas y ultravioletas.

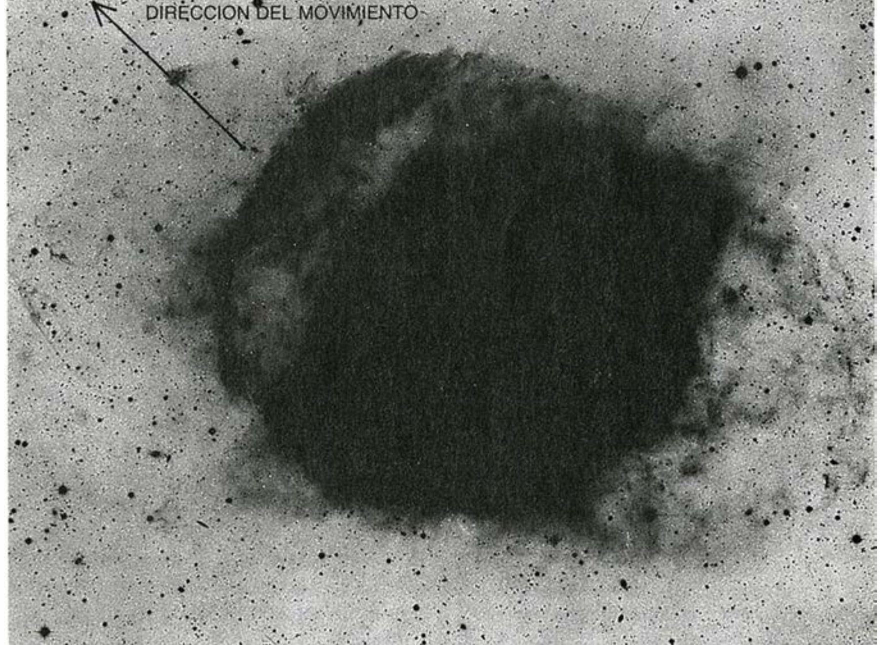
La radiación energética de la estrella se absorbe primero por las regiones más interiores de la nebulosa. A medida que la estrella central continúa calentándose y la nebulosa se expande —y, por tanto, pierde densidad—, se ionizan zonas cada vez más extensas de la nebulosa. Simultáneamente, el polvo se hace más tenue y crece con rapidez la luminosidad visible de la nebulosa. Cuando las nubes de gas adquieren brillo suficiente para ser observadas con telescopios ópticos terrestres, el objeto se convierte en nebulosa planetaria. En su máximo, unos miles de años después de la eyección de la nebulosa planetaria, la estrella alcanza una temperatura de unos 200.000 kelvins y una luminosidad semejante a la que tenía cuando era estrella gigante (miles de veces la del Sol).

La penetración gradual de radiación ionizante a través de la nebulosa explica la correlación positiva observada entre el tamaño de una nebulosa planetaria y su masa ionizada total. La nebulosa planetaria más ligera tiene aproximadamente 0,01 masas solares y un radio de 0,05 años luz; las más masivas alcanzan aproximadamente la masa solar y un diámetro de varios años luz. La longitud de onda y la intensidad de la radiación emitida por los distintos elementos dependen de la temperatura, la densidad y la energía de la radiación ionizante, condiciones que varían sustancialmente a lo largo de la nebulosa.

Algo de materia continúa saliendo de la estrella central aun después de la fase de rama gigante asintótica. El ritmo de pérdida de masa de la estrella es ahora reducido (entre 10^{-10} y 10^{-7} masas solares al año), pero este débil flujo de materia se mueve a una velocidad extremadamente elevada, entre 1000 y 4000 kilómetros por segundo. Constituye el viento rápido que se aprecia en los estudios espectrales de algunas nebulosas planetarias. Su ligereza refleja la mucho mayor pequeñez y densidad actual de la estrella: el material debe moverse unas cien veces más deprisa que el superviento a fin de escapar a la gravedad superficial de la estrella.

Aunque la masa total que transporta sea despreciable, el viento rápido desempeña un papel dinámico destacado en el desarrollo de las nebulosas planetarias, y los primeros en señalar su importancia fueron Sun Kwok, de la Universidad de Calgary,





gular de materia desde la estrella central. El movimiento de la estrella a través del medio interestelar comprime un arco gaseoso que la precede, como se aprecia en la parte superior izquierda de una exposición más larga (*centro*). La imagen más sensible de la nebulosa (*derecha*) sobreexpone las zonas centrales, pero dibuja una débil formación cónica por delante de la nebulosa y ondas gaseosas de baja densidad que la siguen. (Secuencia cedida por David F. Malin.)

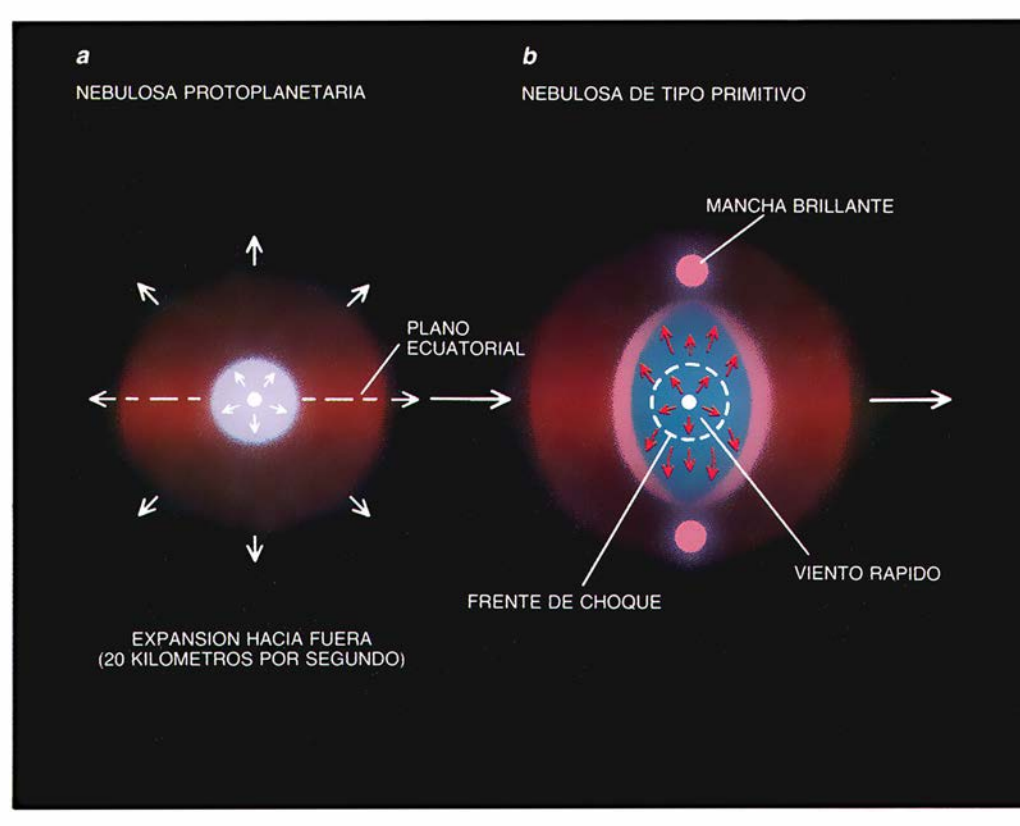
C. R. Purton, del Observatorio Radioastrofísico del Dominio, y M. Pim FitzGerald, de la Universidad de Waterloo. El viento rápido forma una onda de choque rodeada por una burbuja de gas caliente y tenue en la región central de la nebulosa. La presión de la burbuja acelera el material del superviento, que se mueve lentamente en el exterior. En la unión de ambos flujos gaseosos se forma una delgada capa de gas especialmente denso, con la apariencia de un borde brillante.

En ciertos casos, el frente de avance del superviento comprime el material procedente del viento regular que anteriormente había emitido la estrella en su fase de gigante asintótica. Este proceso origina la corona, un estrato brillante. Asimismo, el viento regular puede interactuar con el tenue material interestelar produciendo un débil halo brillante ramificado.

Al cabo de varios miles de años, la estrella se vuelve muy compacta y el viento rápido cesa. Una vez agotado el hidrógeno remanente próximo a la superficie, termina la fusión nuclear y la estrella empieza a enfriarse y a debilitarse. La expansión continua amortigua el brillo superficial de la nebulosa. Finalmente, la nebulosa planetaria desaparece por completo, y entonces la estrella central, compacta y desnuda, pasa a inscribirse entre las enanas blancas. La duración del viento rápido y el tiempo necesario para agotar el hidrógeno combustible dependen estrechamente de la masa inicial de la estrella central: las de gran masa brillan más intensamente y evolucionan más deprisa que las ligeras. En términos aproximados, transcurridos de 10.000 a 30.000 años desde su primera aparición, la nebulosa planetaria se desvanece en la invisibilidad.

No todas las estrellas atraviesan la fase de nebulosa planetaria. Las que no llegan a 0,8 veces la masa solar carecen de suficiente masa para formar una nebulosa. Quedan también excluidas las estrellas de más de ocho masas solares puesto que acaban su vida en violentas explosiones de supernovas. Los astrónomos han llegado, por consiguiente, a la conclusión de que sólo las estrellas cuya masa se encuentra entre 0,8 y ocho veces la solar pueden constituir, en su evolución, nebulosas planetarias.

Tal conclusión está respaldada por el tipo de distribución que adoptan las nebulosas planetarias en el seno de la galaxia. En efecto, la mayoría de las nebulosas conocidas están concentradas en el disco planar de la Vía Láctea, formado en general por estrellas relativamente jóvenes. El predominio de nebulosas planetarias en el disco revela que la mayoría procede de estrellas jóvenes, de vida corta y con masa superior a la solar. Por otro lado se han observado cinco nebulosas en los extremos más lejanos del halo galáctico; es éste una población, débil y esférica, de estrellas que circunda el disco. La edad media de las estrellas del halo es de 10.000 millones de años, y por ello cabe suponer que las nebulosas planetarias del halo procedan de estrellas de masa solar o algo más ligeras.



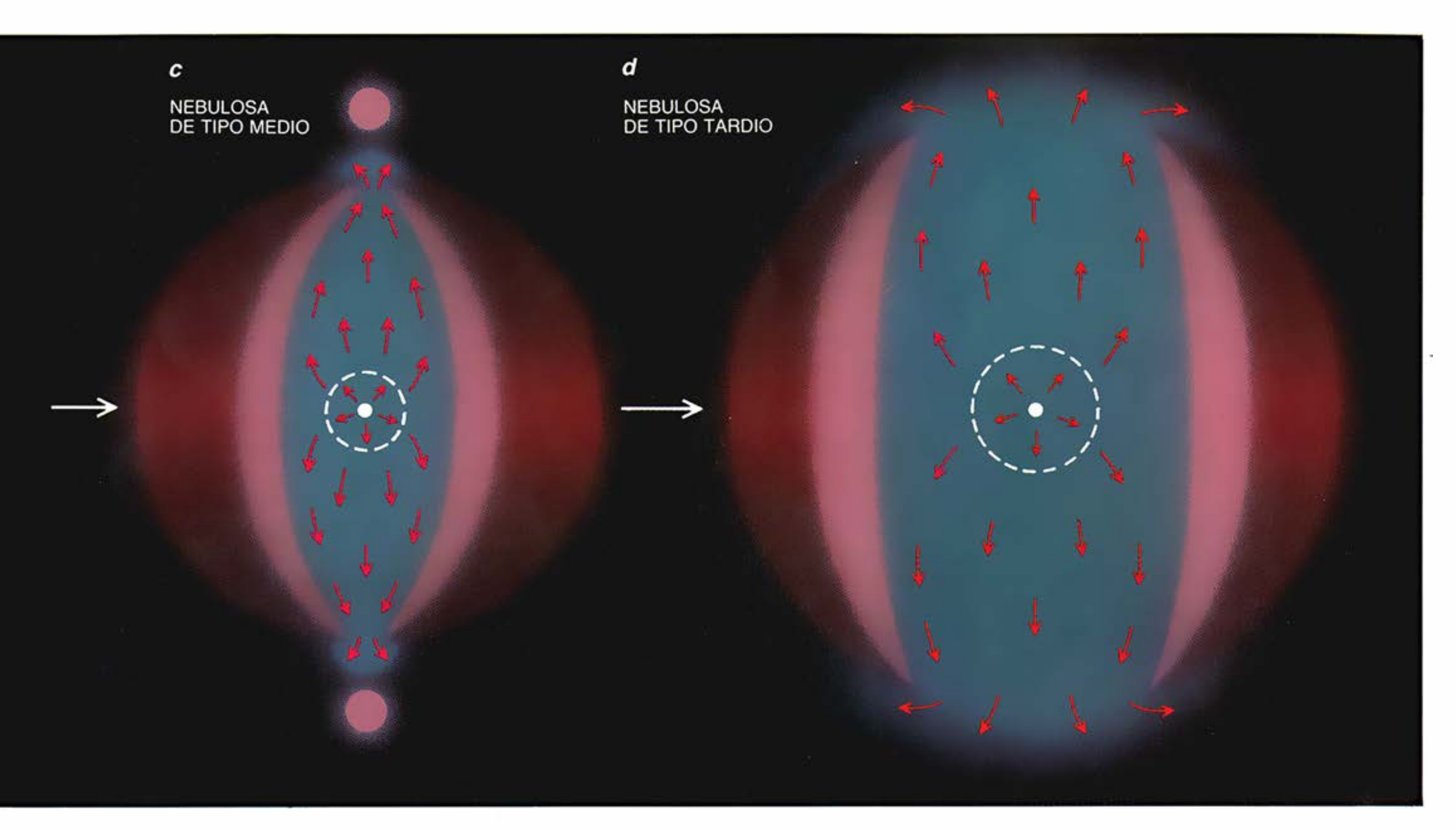
5. GUION EVOLUTIVO para explicar la miríada de formas de las nebulosas planetarias. El flujo saliente de la estrella a menudo se concentra en la dirección ecuatorial (*a*), probablemente por atracción gravitatoria de una estrella compañera; la nebulosa

La estructura de una nebulosa planetaria es muy sensible al entorno en el que se forma y desarrolla. En ausencia de toda influencia externa, podría esperarse que las estrellas produjeran burbujas gaseosas perfectas, pese a lo cual menos de la décima parte de las nebulosas catalogadas son esféricas. La mayoría presenta un claro eje de simetría, que indica la intervención de fuerzas adicionales.

Las nebulosas planetarias se llaman elípticas si su asimetría es moderada, como ocurre con la NGC 3242 ("el fantasma de Júpiter"); se consideran del tipo mariposa si presentan una fuerte asimetría, como la NGC 650-1 ("el juego de pesas") y la NGC 2346. En muchas nebulosas se observan además dos manchas brillantes a lo largo de los polos en caras opuestas de la estrella, tal como aparece en la NGC 7009 (nebulosa Saturno). Todas estas nebulosas de variados tipos presentan simetría axial; en otras palabras, cada una de sus dos mitades es imagen especular de la otra con respecto al eje de simetría.

La mayoría de los modelos sostienen que las formas de simetría axial obedecen a pérdidas de masa desmesuradas en el plano ecuatorial de la estrella durante la fase de superviento. En apoyo de tales modelos, Bruce Balick, de la Universidad de Washington, señaló que los datos recogidos en observaciones indican que el gas se concentra en los planos ecuatoriales de las estrellas.

Mark R. Morris, de la Universidad de California en Los Angeles, sostiene que las nebulosas planetarias no esféricas se han desarrollado a partir de sistemas estelares binarios. Afirma, en efecto, que, durante su fase de rama gigante asintótica, la estrella progenitora crece tanto que su envoltura externa se insinúa en su estrella compañera. El gas de la envoltura



toma forma elíptica o de mariposa. La estrella puede eyectar gas en la dirección polar, y originar manchas brillantes (*b*). El viento rápido (*flechas rojas*) de la estrella crea una capa comprimida y brillante en su encuentro con el superviento. Debido a la menor densidad en los polos, el viento rápido rompe allí primero (*c*) y luego se expande por el medio interestelar (*d*).

forma un disco que gira en torbellino alrededor de dicha compañera, saliendo dos chorros de materia proyectados perpendicularmente al disco (el fundamento físico de este proceso todavía no está claro, pero es corriente encontrar chorros polares que surgen de estrellas rodeadas por discos de materia). Los efectos de marea procedentes de la estrella compañera hacen que el superviento se concentre en el plano de su órbita. El material que proyectan los chorros polares produce las brillantes manchas gaseosas en la dirección perpendicular.

En colaboración con Mario Livio, del Instituto de Tecnología Technion de Israel, he desarrollado un modelo que explica el origen de las nebulosas planetarias de elipticidad menos pronunciada. Nuestro modelo se asemeja al elaborado por Morris, salvo en que la estrella compañera se sitúa en una órbita más próxima, dentro de la envoltura de la estrella progenitora. Las fuerzas de marea y el arrastre gravitatorio determinan que la compañera describa una espiral hacia dentro, pero en compensación el gas del plano orbital de la compañera sale hacia fuera con mayor rapidez, de lo que resulta un superviento particularmente fuerte en el plano de la órbita.

En el modelo enunciado, la nebulosa adopta al expandirse una forma más elíptica que esférica. Los astrónomos han descubierto que algunas nebulosas planetarias elípticas y del tipo mariposa tienen realmente en sus centros sistemas binarios cuyos períodos orbitales son de horas o días solamente. Esta brevedad denuncia un par de estrellas estrechamente vinculadas, que orbitan separadas por unos pocos millones de kilómetros.

La forma de una nebulosa planetaria puede venir también condicionada por su movimiento a través del medio interestelar; la densidad de este medio, extremadamente rarificado, es de aproximadamente un átomo por centímetro cúbico en el plano galáctico, para decrecer de manera brusca por encima y por debajo de dicho plano. Cuando una estrella va orbitando, con la nebulosa que la acompaña, a través de la Vía Láctea, el medio interestelar sopla a velocidades que van de los 40 a los 150 kilómetros por segundo. La parte de la nebulosa que encara el flujo decelera y se comprime en la dirección del movimiento. La cara comprimida se torna bastante más densa que las zonas que la rodean y, por tanto, resplandece más.

En el encuentro del material de la nebulosa con el medio interestelar pueden presentarse efectos complejos. En el caso de la nebulosa Hélice, parece que un gas muy tenue haya sido agitado y comprimido a cierta distancia por delante, en la dirección de traslación de la nebulosa. Actualmente, sólo se han observado signos claros de interacción con el medio interestelar en unas diez nebulosas planetarias. Si esta muestra puede aumentarse sustancialmente, los astrónomos dispondrán de un instrumento útil para analizar la densidad y otras propiedades físicas del medio interestelar.

Pese a lo mucho que se ha avanzado en el estudio de las nebulosas planetarias, algunos de sus atributos físicos fundamentales, como la masa y el tamaño, todavía no se conocen con seguridad, ante la dificultad de determinar la distancia a que se encuentran. Afortunadamente, unas cuantas nebulosas forman parte de sistemas estelares bien conocidos, y dos de ellas han sido observadas en cúmulos globulares —cúmulos esféricos densos que contienen hasta un millón de estrellas—, cuya lejanía se ha establecido con precisión. Varios centenares de nebulosas parecen residir cerca del centro galáctico, pudiendo suponerse que todas distan de

la Tierra aproximadamente lo mismo que el propio centro, es decir, unos 25.000 años luz.

Las distancias a la Tierra de las estrellas de otras galaxias son sensiblemente iguales. Por tanto, las estimaciones de las distancias de las nebulosas planetarias en las galaxias cercanas son razonablemente precisas. Se han encontrado unas 60 nebulosas planetarias en la Pequeña Nube de Magallanes (una de las galaxias satélites de la Vía Láctea, a unos 190.000 años luz de distancia), 130 en la Gran Nube de Magallanes (a 160.000 años luz) y algunos centenares en la galaxia de Andrómeda (a dos millones de años luz).

Para la mayoría de las nebulosas planetarias, las técnicas de medición de distancias existentes adolecen de un grado de imprecisión no inferior al 50 %, por exceso o por defecto. Una técnica, propuesta por Julie H. Lutz, de la Universidad estatal de Washington, se funda en el fenómeno de la extinción, o debilitamiento de la luz por el polvo interestelar. La extinción aumenta a medida que las longitudes de onda disminuyen, a través de las bandas óptica y ultravioleta. Contrastando la intensidad observada de dos rayas de emisión a distintas longitudes de onda con la relación esperada teóricamente, Lutz dedujo la cantidad total de debilitamiento. A continuación estimó la extinción por unidad de distancia en la dirección de la nebulosa (a partir de medidas de la luz de estrellas situadas en la misma parte del cielo), tras lo cual ya pudo calcular la deseada distancia.

Varios métodos de determinar distancias se apoyan en las propiedades que, por término medio, presentan un gran número de nebulosas planetarias. Por ejemplo, si se supone que todas contienen la misma cantidad de gas ionizado, la distancia a una nebulosa remota se puede extrapolar a partir de la distancia a otra mucho más cercana. Para hallar las distancias de las nebulosas planetarias, se compara el tamaño angular y la intensidad de la emisión de los iones hidrógeno de una nebulosa desconocida con los de una conocida; este método, que sería muy impreciso para cualquier nebulosa individual, puede proporcionar unos valores medios de distancia razonables para un grupo numeroso.

Las determinaciones de distancia basadas en muestras de nebulosas planetarias poseen importantes aplicaciones potenciales para la cosmología. Los investigadores desean apasionadamente obtener medidas fiables de las distancias a galaxias remotas con el fin de determinar la velocidad de expansión del universo, lo que se denomina constante de Hubble. Encontrar el valor real de esa constante nos permitiría deducir el tamaño y la edad del universo, información que a su vez ayudaría a responder preguntas sobre cómo se inició el universo y cuándo y cómo terminará. En la actualidad, la constante de Hubble solamente se conoce con un factor dos de imprecisión.

Se acostumbra medir las distancias de las galaxias próximas mediante el recurso a las variables Cefeidas, una clase de estrellas. Las nebulosas planetarias son brillantes y bastante fáciles de identificar en galaxias cuyas estrellas aparecen todas mezcladas y difuminadas. Además, las nebulosas radian intensamente en determinadas longitudes de onda, lo que facilita separar su emisión de la que proviene del resto de la galaxia. Robin Ciardullo, de la Universidad estatal de Pennsylvania, George Jacoby, del Observatorio Nacional de Kitt Peak, y Holland Ford, del Instituto Científico del Telescopio Espacial, junto con varios colaboradores, utilizan ya las nebulosas planetarias a modo de varas de medir celestes.

Los investigadores parten del supuesto según el cual tipos de galaxias semejantes deben contener similares poblaciones de nebulosas planetarias. En concreto, si las nebulosas se clasifican por su distinto grado de luminosidad, la proporción de la población dentro de cada clase debe ser aproximadamente la misma en unas y otras galaxias. Puesto que la meta final es hallar la distancia de las galaxias remotas, los astrónomos han concentrado su atención en las nebulosas planetarias más brillantes, y en particular las han observado en la raya del oxígeno de doble ionización (5007 angstroms), donde se identifican con facilidad.

Ciardullo y sus colaboradores han encontrado que, incluso en galaxias cuya estructura y composición estelar difieren ligeramente, las nebulosas planetarias de mayor brillo muestran casi la misma luminosidad a 5007 angstroms, llegando a la conclusión de que este subgrupo de nebulosas puede utilizarse como una candela estándar, es decir, una fuente cuyo brillo absoluto se conoce y no depende de su localización.

Partiendo de la luminosidad esperada de las nebulosas más brillantes, podemos deducir la distancia a cualquier galaxia en la que se identifiquen positivamente nebulosas planetarias. Stuart R. Pottasch, del Instituto Astronómico Kapteyn, ha demostrado que este método permite obtener distancias precisas al centro galáctico, distancias que se habían medido también siguiendo otras técnicas más consolidadas.

El grupo de Ciardullo ha estimado la distancia a la galaxia Virgo, y ha calculado un valor de la constante de Hubble que se sitúa en el extremo superior del margen de las estimaciones anteriores. Su hallazgo implica que el universo es más pequeño y más joven —su edad ronda los diez mil millones de años— que lo que la mayoría de los cosmólogos cree. Estas cifras, sin embargo, son provisionales y objeto de controversia. Las observaciones de nebulosas planetarias en otras galaxias y las comprobaciones ulteriores basadas en otros patrones de medición de distancia ayudarán a perfeccionar la técnica que emplea estas nebulosas a modo de candelas normalizadas.

Muchos otros aspectos de las nebulosas planetarias reclaman nuevas aclaraciones: no se comprende del todo la extraordinariamente rápida transformación de las estrellas de la rama gigante asintótica en nebulosas, ni tampoco se ha dilucidado la naturaleza del superviento y del viento rápido y el modo de interacción entre ambos. A medida que ahondemos en las nebulosas planetarias, se nos ofrecerá nueva información acerca de los entornos espaciales, desde los interiores de estrellas viejas semejantes al Sol al tenue material que inunda la Vía Láctea entera. Y entenderemos mejor el breve momento de gloria final que espera a nuestro Sol dentro de cinco mil millones de años.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

PLANETARY NEBULAE. Stuart R. Pottasch. D. Reidel Publishing, 1984.

PLANETARY NEBULAE AND THEIR CENTRAL STARS. James B. Kaler en *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 23; 1985.

STARS AND THEIR SPECTRA: AN INTRODUCTION TO THE SPECTRAL SEQUENCE. James B. Kaler. Cambridge University Press, 1989.

THE EVOLUTION OF THE PLANETARY NEBULA NGC 6826. Philip Plait y Noam Soker en *Astronomical Journal*, vol. 99, n.º 6, págs. 1883-1890 y 2169; junio de 1990.

ON THE FORMATION OF ANSAE IN PLANETARY NEBULAE. Noam Soker en *Astronomical Journal*, vol. 99, n.º 6, págs. 1869-1882; junio de 1990.

Perfiles

Marguerite Holloway

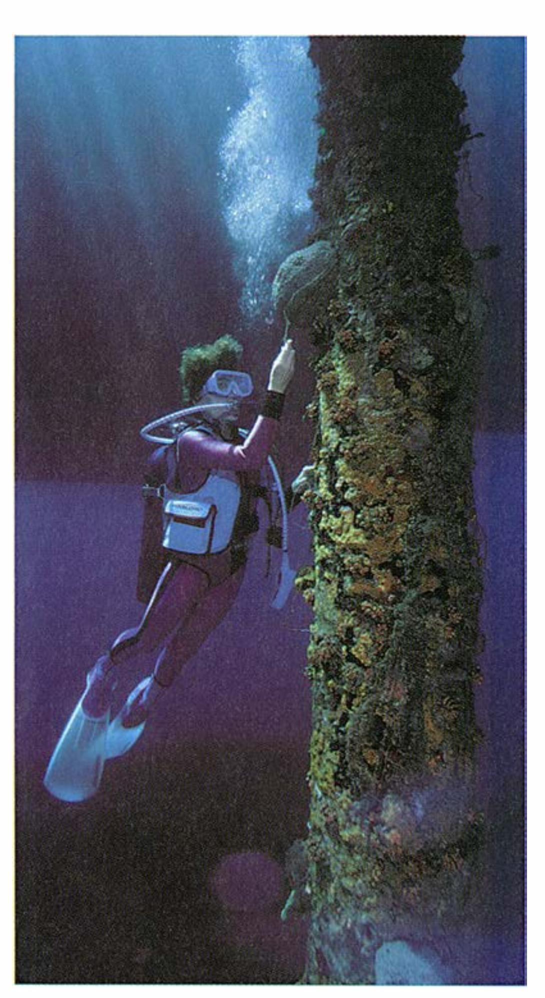
SILVIA A. EARLE: *fuego en el agua*

Es difícil arrancar algo concreto de Sylvia A. Earle. Cual Proteo de nuestros días —el dios cambiante de los mares— se muda con facilidad de un proyecto a otro y de un personaje a otro: botánica marina, buceadora de profundidad, exploradora, empresaria, ecologista, escritora y, hasta hace poco, directora científica de la Administración Nacional del Océano y de la Atmósfera (NOAA). Incluso en sus modales, Earle es, según el momento, extrovertida, suave, diplomática, reservada, franca, graciosa o agresiva.

La capacidad de ser muchas cosas le ha permitido vivir con un pie en el agua y otro en tierra. Pero prefiere el mar. "Me pudro en tierra firme", se queja. Con su cargo político, Earle tenía cierto peso en una administración estatal no precisamente famosa por su ecologismo. Pero dejó el cargo en enero, siendo la primera mujer que encabezaba la NOAA, una agencia con un presupuesto de mil quinientos millones de dólares que supervisa el servicio de salud, lleva a cabo investigaciones submarinas, administra recursos pesqueros y es responsable de los vertidos al mar de materiales peligrosos.

El científico se ahogaba con el traje del político. "Cada vez que hablaba, mis palabras se iban a interpretar como una voz autorizada de la administración, y, por tanto, como si se tratara de la política oficial", explica sentada en su oficina de la NOAA en Washington, desnuda ahora de sus recuerdos acuáticos, salvo de una morena de plástico enroscada en torno a su ordenador. Rememora la algarabía que se armó cuando expresó que no comía ningún pez que hubiera conocido personalmente. La frase se interpretó en el sector pesquero como una inesperada política de la NOAA en contra del consumo de pescado. El hecho de ser un personaje público no es algo nuevo para Earle. En 1970, ella y otras cuatro oceanógrafas se pasaron dos semanas viviendo en un habitáculo submarino, dentro de un proyecto Tectites II.

Ha vencido sus reticencias contra la divulgación científica. "Ante algunos colegas pierdes credibilidad si ven tu nombre entre la masa". Pero tras la lectura de un ensayo de Thomas Huxley, biólogo de la época victoriana, se le despertó el sentido de la responsabilidad con respecto a la educación del público, "La verdad es otra: muchos se desaniman ante la dificultad de mantener la precisión y la exactitud cuando exponen ante los legos".



6000 horas bajo el agua han hecho de Sylvia Earle una ecologista a ultranza. Fotografía: David Doubilet.

Pero incluso esos hipercríticos que examinan con lupa sus artículos ligeros alaban su habilidad de comunicar cautivadoramente cuanto se refiere a la vida marina y a la importancia del estudio de los océanos. Aunque ha descendido a las profundidades en vez de subir a las alturas como los astronautas, percibe el planeta como un sistema integrado y azul. Espolvorea sus vivencias de 6000 horas submarinas con retazos de poesía: "El calamar no es simplemente un cefalópodo, del orden de los Teutoideos, sino una criatura de ojos enormes que no dejará de mirarte. Algunos son auténticas joyas".

El amor de Earle por el océano empezó en su juventud. Su familia se trasladó de Nueva Jersey a la costa occidental de Florida, donde sus padres le animaron en su interés por las actividades al aire libre. "A mí no me enseñaron las ranas como diciendo 'puaj', sino que mi madre nos mostraba a mis hermanos y a mí cuán bonitas eran y qué fascinación mirar sus ojos dorados y brillantes". A la vez que apoyaban su inclinación por la biología, añade, se preocuparon de que obtuviera un título que le capacitara para la docencia y de que aprendiera a escribir a máquina, "por si acaso".

Tras cursar estudios en la Universidad estatal de Florida, Earle entró en un programa para graduados en la de Duke y se especializó en botánica. Para su tesis, realizó un trabajo académico clásico sobre las algas del golfo de México. No ha abandonado esa labor y posee más de 20.000 muestras.

Sus años de formación coincidieron con los de difusión del submarinismo. Como el equipo de buceo permite la observación directa, el estudio de la biología marina cambió. Earle, una de las primeras investigadoras que exploraba libremente el mundo submarino, descubrió nuevas plantas y organismos, y hasta sorprendentes rasgos del relieve, como

las “dunas” submarinas de las islas Bahamas.

Era también una de las contadas mujeres oceanógrafas. Lo que no deja de tener aún sus inconvenientes. Asegura que le han denegado puestos, como el de dirigir buques oceanográficos, por ser mujer. Pero comporta, asimismo, ventajas; por ejemplo, la de su agresiva independencia. Las mujeres confían más en sí mismas. Lo dice ella que fue la primera persona que descendió a 1250 pies sin sujecciones, embutida en un traje rígido de buceo, y uno de los primeros pilotos en llevar un sumergible en solitario hasta los 3000 pies.

Piensa volver a la ingeniería de suelos oceánicos. En 1981, Earle y su entonces marido Graham Hawkes decidieron construir sus propios vehículos de exploración del fondo marino. Entre ambos fundaron la sociedad Deep Ocean Technologies, y poco después la Deep Ocean Engineering, que es ahora la principal compañía. Uno de los primeros sumergibles tripulados que diseñaron, Deep Rover, llevó a Earle a más de 3000 pies bajo las aguas del Pacífico en 1985. La compañía, cuyo capital es de 5 millones de dólares, también ha producido robots para las explotaciones petroleras y de gas en mar abierto.

Se lamenta de que no llegue al 10 por ciento el total explorado de los océanos, y de las limitaciones de la técnica actual que impide a los particulares darse una vuelta por el fondo abisal. “Es patético que no podamos bajar al fondo marino”, exclama, añadiendo que de los cinco sumergibles tripulados del mundo que pueden adentrarse más allá de los 20.000 pies, los Estados Unidos sólo poseen uno: el *Sea Cliff*. “Es como tener un todo terreno para toda Norteamérica”, dice.

Pero ella siempre encuentra alguna puerta abierta para bajar a las profundidades marinas. Ahora trabaja con científicos japoneses que planean enviar primero un vehículo por control remoto y luego otro tripulado hasta 36.000 pies. “Su gobierno no les regatea el dinero. Se empeñan con todas sus fuerzas en la ciencia y tecnología oceánica”, dice Earle. Earle también tiene la intención de dirigir Ocean Everest, un proyecto de 10 millones de dólares de Deep Ocean Engineering que también la llevaría hasta una profundidad similar.

Defiende el avance técnico con el mismo vigor con que repudia su uso desviado. “Tenemos la capacidad técnica de inclinar peligrosamente la balanza del equilibrio de cualquier especie”, se irrita, citando no sólo la destrucción de los pozos petrolíferos de Kuwait por Saddam Hussein y el derrame provocado de crudo en el golfo Pérsico, sino también las artes de arrastre y los buscadores eléctricos de pescado usados por algunos pescadores.

Earle, que ha trabajado en World Wildlife Fund International y otras entidades altruistas similares, aboga por la creación de santuarios marinos. Contempla esas reservas submarinas, de las que hay 10 en las aguas territoriales estadounidenses, como algo análogo de los parques nacionales, para conservar la vida salvaje, fomentar los estudios de campo y la facilitar la diversidad de las especies.

Pero la guerra del Golfo, así como un incendio en Oakland (California), que por poco destruye su casa el pasado otoño, le han hecho volver al agua. Esos sucesos “han provocado que se avive en mí un sentido de urgencia mayor que el que tenía antes sobre la necesidad de hacerlo lo mejor que puedas con el tiempo que tengas”.

A pesar de su breve puesto en la NOAA, se le reconoce el mérito de darle mayor protagonismo a la agencia. Muchos citan sus esfuerzos por asegurar que se estudiaran los efectos de la guerra del Golfo. La NOAA ha enviado un buque de investigación en un viaje que costará entre 6 y 8 millones de dólares. De la expedición, en la que participan unos 130 científicos de todo el mundo, se espera que establezca las bases para un programa continuado de seguimiento del Golfo. La intervención personal de Earle se centra en el examen de los efectos que el crudo haya podido causar en los arrecifes coralinos.

Mientras tanto sigue repitiendo, a quien quiera oírle, un mensaje de integridad ambiental, utilización respetuosa e investigación redoblada del océano. Como parte de este esfuerzo, se dirigió hace poco a los alumnos de la Universidad Rutgers. Por la piel de éstos pasó un brisa fría cuando, a oscuras el aula magna, ella, bajo la imagen proyectada de un calamar sonrosado, describía el fragmento de tentáculo enorme hallado en la bahía de Monterrey, en el estado de California: “nadie ha visto todavía ningún calamar gigante. Habla con elocuencia sobre nuestra ignorancia el que no hayamos sido capaces de observar algo del tamaño de un dinosaurio”.

Ciencia y sociedad

Cosmología

Su edad de oro

El 23 de abril, George F. Smoot, del Laboratorio Lawrence de Berkeley, y sus colaboradores daban cuenta del nuevo capítulo que se acababa de escribir sobre la versión científica de la historia de la creación. En rueda de prensa anunciaban que un instrumento del satélite *Explorador del Fondo Cósmico* (Cosmic Background Explorer o COBE), de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA), había detectado restos de estructuras agrupadas que existieron 300.000 años después del nacimiento del universo, en una simpar explosión ("Big Bang"), hace de 10.000 a 15.000 millones de años. En breve, el COBE puede haber encontrado el plano primitivo que determinó la arquitectura del universo. El alcance de ese hallazgo se ha comparado con el descubrimiento de los fósiles para asentar la teoría de la evolución.

Los fósiles que el COBE ha desenterrado están constituidos por variaciones del débil resplandor que impregna todo el universo en la región de las microondas. Se cree que esas variaciones siguen el rastro de antiguas ondas de pequeña amplitud que pudieron ser el germen de la formación de galaxias y cúmulos. De un solo golpe, los descubrimientos del COBE han dado sólido respaldo a la teoría de la gran explosión, al tiempo que han enviado la mayoría de los modelos de los cosmólogos al cubo de la basura. Y el descalabro hubiera sido mayor si el satélite no hubiera hallado las fluctuaciones reveladoras.

El satélite, lanzado en las postrimerías de 1989, había sido concebido por los expertos del Centro de Vuelos Espaciales Goddard de la NASA para realizar mediciones precisas de la radiación de fondo. Una batería de instrumentos del COBE, los radiómetros diferenciales en microondas, se dedicaron los dos últimos años a la búsqueda de desviaciones respecto a la uniformidad en las microondas celestes. En la comunidad astronómica habían venido circulando rumores de los resultados antes de que Smoot y su grupo resumieran los hallazgos en la reunión anual de la Sociedad Americana de Física. Pero, ¿son fidedignos los resultados? ¿Qué significan para la cosmología?

La radiación de fondo en microondas ha constituido un punto de apoyo de la teoría cosmológica desde que la descubrieran Arno A. Penzias y Robert W. Wilson, de los Laboratorios de la Bell Telephone, en 1964. Perplejos, en un comienzo, ante el misterioso ruido en microondas que parecía penetrar en su antena, procedente de todas las direcciones, hablaron con Robert H. Dicke, de Princeton; éste les reveló que la teoría de la gran explosión predecía justamente tal distribución global de microondas.

Los teóricos ven en esta radiación una reliquia de los tiempos de la gran explosión, cuando el universo estaba formado por una sopa opaca y extremadamente caliente de radiación y partículas dotadas de carga. Cuando la temperatura del universo descendió hasta 3000 kelvins (300.000 años después de la gran explosión), los protones y electrones se combinaron para formar hidrógeno transparente y neutro. En esa época, la materia y la radiación marcharon cada una por su camino. En los 15.000 millones de años de expansión transcurridos desde entonces, la radiación se ha enfriado hasta una temperatura efectiva de 2,74 kelvins, tan baja que todos los elementos, salvo el helio, se congelarían.

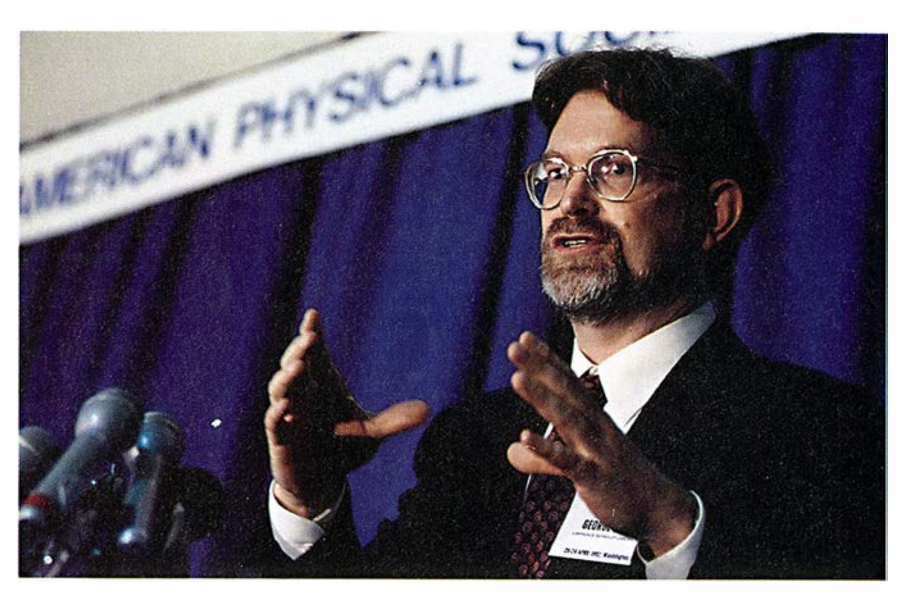
El fondo de microondas continúa siendo una de las principales pruebas que apoyan la hipótesis de un universo que empezó siendo una masa inimaginablemente caliente y compacta.

Uno de los principales objetivos del COBE era poner a prueba la teoría midiendo el espectro del fondo de microondas. La versión más sencilla de la gran explosión predice que la radiación del ardiente universo primitivo debería mostrar una curva espectral suave, un espectro de cuerpo negro. En enero de 1990, John C. Mather y sus compañeros del Centro Goddard presentaron el espectro de microondas del COBE en una reunión de la Sociedad Astronómica Americana. La gráfica que Mather puso sobre el retroproyector se parecía tanto a la curva de un cuerpo negro perfecto que se diría copiada de un libro de texto. Los astrónomos asistentes rompieron en espontáneos aplausos.

Los recientes datos del COBE están desanudando un problema más espinoso. Durante los últimos 28 años, los cosmólogos han buscado sin éxito variaciones en la radiación producidas por irregularidades en la gran explosión. Al mismo tiempo, han ido prestando un interés creciente a la escala y la complejidad de la estructura cósmica. Las exploraciones de vastas ringleras de espacio revelan que las galaxias se organizan en láminas y filamentos ingentes. Las mayores formaciones se extienden a lo largo de 300 millones de años-luz, aproximadamente un 3 por ciento del radio del universo visible. Se han observado también galaxias y cuásares remotos, cuya lejanía denuncian un momento de formación en torno sólo a los 1000 millones de años subsiguientes a la gran explosión.

Para producir esos objetos enormes y distantes no hace falta postular un cosmos primitivo amontonado. La gravedad ensancha cualquier variación: las regiones ligeramente más densas que el promedio tienden a agruparse, concentrándose de manera progresiva a expensas de regiones más ralas en comparación. Pero al principio tuvo que existir alguna estructura para que se iniciara ese efecto multiplicador de la gravitación.

EL MAPA DEL COBE muestra que nuestra galaxia (banda horizontal) *domina el cielo de microondas. Imagen: Laboratorio Lawrence de Berkeley.*



EL INVESTIGADOR DEL COBE George F. Smoot anuncia al mundo que "la gran explosión está viva y goza de buena salud... muy buena salud". Foto: AP/World Wide Photos.

Allí donde la materia se acumuló, el tirón local de la gravedad extraería energía de los fotones salientes (partículas de radiación electromagnética), de modo que la radiación de fondo que se originase en tal región parecería relativamente fría. Las bolsas de baja densidad parecerían cálidas por la misma razón. La naciente estructura, por consiguiente, se mostraría a modo de lunares de temperatura dispar en el cielo de microondas.

Para desconcierto de los partidarios de la gran explosión, los estudios cada vez más refinados del fondo de microondas continuaban mostrando un resplandor de radiación absolutamente uniforme. En coherencia, los teóricos ajustaron sus modelos para encajar fluctuaciones iniciales de densidad cada vez más pequeñas. Pero lo hacían a sabiendas de que, en algún punto, la ausencia de variaciones de temperatura detectables hundiría la cosmología de la gran explosión. Los instrumentos de precisión del COBE han venido en su rescate. Las fluctuaciones detectadas difieren de la temperatura media del cielo en una parte en 100.000, cerca del límite de la sensibilidad del COBE.

Hablemos de la fiabilidad de los resultados. El mapa del cielo de microondas realizado por el COBE está minado por ruido instrumental. Casi dos tercios de los datos registrados en el mapa los generó el propio COBE, o se produjeron en fuentes próximas inadvertidas; pero no proceden del universo recién nacido. Algunas de las fluctuaciones que aparecen en el mapa representan verdaderas señales, pero los expertos no pueden todavía discriminar el origen genuino de cada una. Sólo aplicando técnicas de análisis matemático, tales como el promediado estadístico, puede demostrarse que algunas de esas manchas o lunares no están provocadas artificialmente por los instrumentos.

El motivo de la existencia de esa nube de ambigüedad reside en la hercúlea tarea que exige atender a cada fuente de radiación de microondas diferente de la del fondo cósmico. Nuestra galaxia, la Vía Láctea, radia copiosas microondas que el grupo de Charles L. Bennett, del Goddard, hubo de restar para revelar la señal de fondo. Otras galaxias también emiten microondas, y las ardientes nubes gaseosas en los cúmulos de galaxias introducen sus propias y minúsculas fluctuaciones de temperatura.

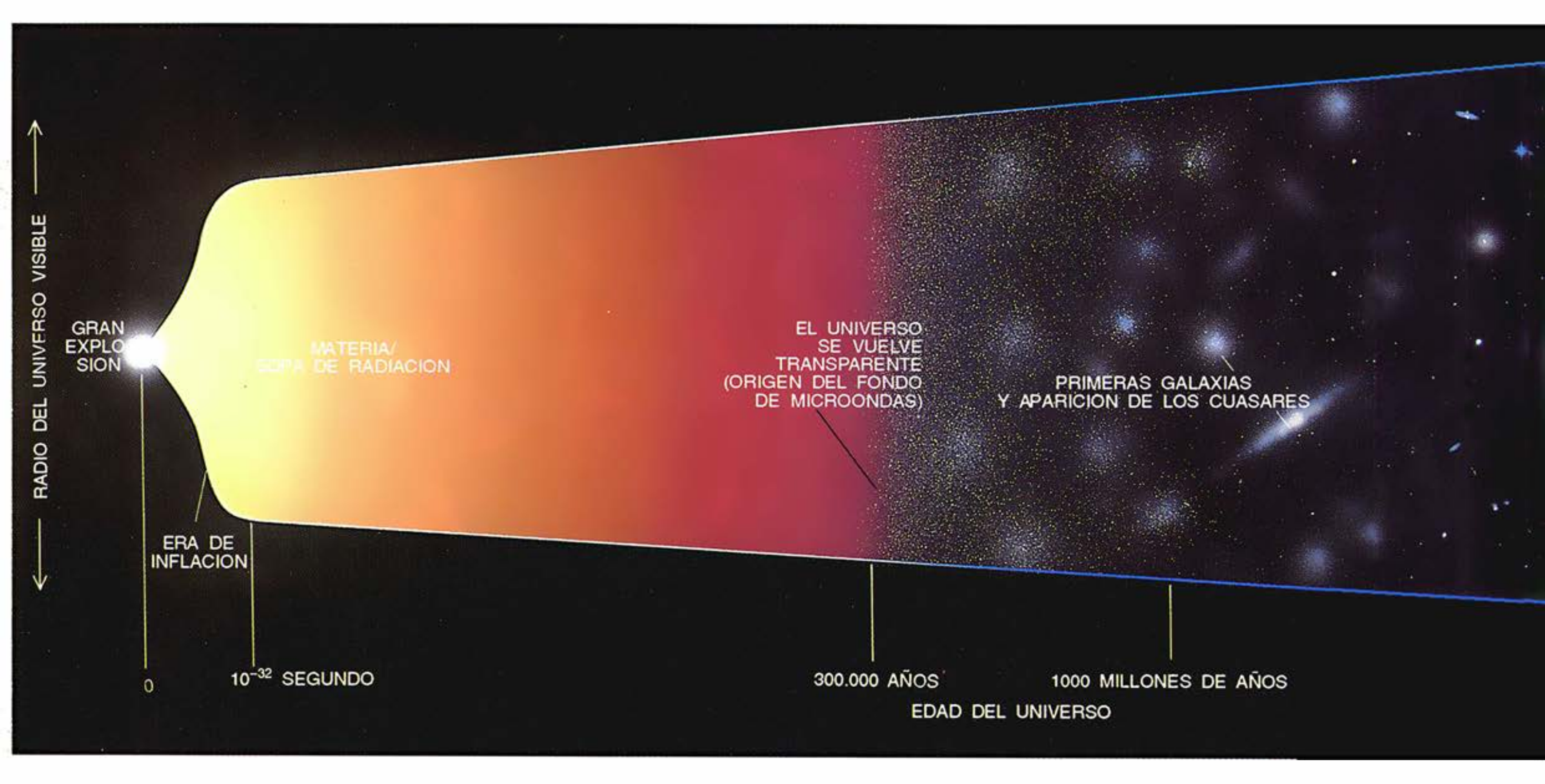
Tales señales no cosmológicas deberían aparecer en pequeñas escalas angulares, pero el COBE observa anchas rebanadas de cielo, de varios grados de anchura (200 veces el área aparente de la Luna). Por consiguiente, el satélite ha de promediar las distintas galaxias de observación. Edward L. Wright, de la Universidad de California en Los Angeles, trató de comprobar si las señales detectadas por el COBE coincidían con las posiciones de cúmulos galácticos conocidos y comparativamente cercanos y no halló correspondencia. Lo que no obsta para que en algunos queden sombras de duda. John P. Huchra, de Harvard, convertido en abogado del diablo, sugiere que las fluctuaciones de las microondas podrían obedecer a una clase desconocida de objetos astronómicos próximos y no a variaciones que sufriera la densidad al poco de la gran explosión.

Pero la mayoría de los cosmólogos no recela de la veracidad de los resultados del COBE y se apresta a analizar sus implicaciones. Claros perdedores en esta carrera son las teorías de las paredes de recintos y texturas: aquellas en que la presencia de defectos densos y de gran energía del campo (esas paredes y texturas) servían de centros de nucleación de galaxias, y predecían la existencia de unas pocas fluctuaciones de temperatura particularmente intensas que el COBE no ha encontrado. David N. Spergel, de Princeton, que ha trabajado en cosmologías basadas en texturas, encajó la noticia con deportividad. "Las texturas han muerto", reconoció. "Así es la cosmología."

Gana, por contra, la teoría inflacionaria, versión modificada de la hipótesis de la gran explosión que fue desarrollada a principios de los ochenta por Alan H. Guth, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, y refinada por Andrei D. Linde, de la Universidad de Stanford, y Paul Steinhardt, de la Universidad de Pennsylvania. De acuerdo con este modelo, el universo atravesó una fase corta, muy poco después de su nacimiento, durante la cual las fuerzas naturales actuaron de manera muy diferente de como operan hoy, hasta el extremo de que la gravedad se comportó como una fuerza repulsiva. En virtud de ello, en el intervalo de una fugaz fracción de segundo (10^{-32} segundos, más o menos) el universo se dilató en 10^{30} veces.

La inflación atrae a muchos cosmólogos porque resuelve dos difíciles rompecabezas: por qué el fondo de microondas tiene virtualmente la misma temperatura en todas las direcciones y por qué la densidad del universo está próxima al valor requerido para que, con el tiempo, se detenga su expansión. Durante el período de inflación, las variaciones locales de temperatura se generalizaron y suavizaron; al mismo tiempo, la geometría del espacio se aplanó (característica de la densidad crítica), cualquiera que fuera su morfología inicial. La inflación aporta también el mecanismo para crear estructuras cósmicas. En esos primeros momentos, diminutas oscilaciones cuánticas de energía se habrían expandido con el resto del universo para convertirse en regiones macroscópicas de elevada densidad. Esas zonas superdensas acabarían por convertirse en los cúmulos y supercúmulos galácticos que conocemos.

Los modelos inflacionarios demandan, para las regiones superdensas,



una distribución (gaussiana) invariante con la escala, esto es, la forma de variación debería aparecer cualitativamente idéntica en todas las escalas angulares. El COBE ha observado justamente tal distribución de regiones cálidas y frías en el cielo. Guth se apresura a señalar que, si bien los resultados del COBE concuerdan con la inflación, no la demuestran.

Los teóricos sustentan puntos de vista discrepantes sobre la suerte que han de correr otras teorías. En un trabajo próximo a publicarse en *Astrophysical Journal Letters*, Wright argumenta que el satélite desautoriza los modelos de isocurvatura. Opinión que no comparte el principal articulador de esas teorías, James E. Peebles, de Princeton. Hay quienes piensan que las teorías que producen estructuras mediante cuerdas cósmicas, o defectos del campo por serpentinas ultradensas relacionados con las texturas, acabarán por hallar acomodo en las observaciones del COBE. Otros no lo ven tan claro y ponen a Spergel como ejemplo de honradez a imitar.

Con independencia del modelo cosmológico al que uno se adhiera, los mapas del satélite plantean una cuestión inquietante. Las fluctuaciones de temperatura son minúusculas, sólo de unas 30 millonésimas de kelvin, o una parte en 100.000. Variaciones tan pequeñas no pueden fácilmente haber producido galaxias densas y altamente organizadas a los 1000 o 2000 millones de años de la gran explosión. La materia ordinaria no podría comenzar a congregarse en estructruras condensadas hasta que el universo se tornara transparente a la radiación, unos 300.000 años después de la gran explosión. Aun entonces, la radiación habría mantenido la materia demasiado caliente para agruparse con tanta presteza en galaxias.

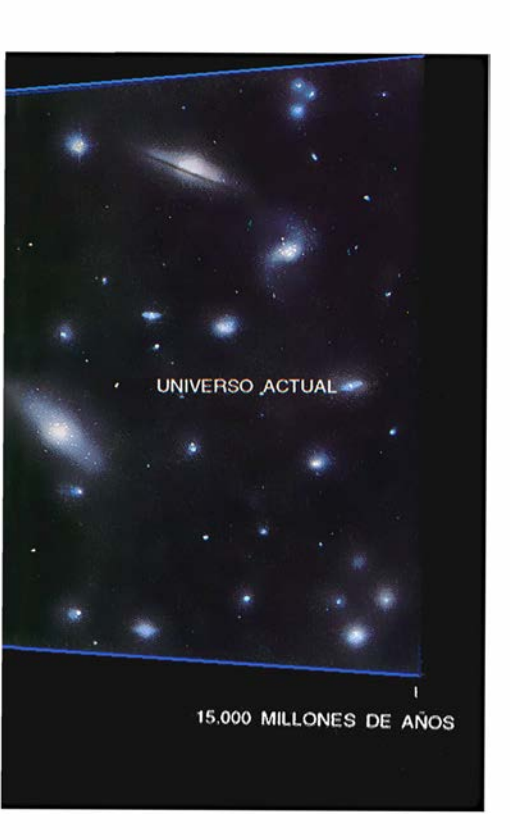
Para salir al paso de esa objeción, desde hace unos años los cosmólogos han apelado a un segundo, e invisible, componente del universo: la materia oscura y fría, que se aglutinaría con mucha mayor facilidad. La existencia de materia fría se adapta sin dificultad a la cosmología inflacionaria porque tales modelos predicen que el universo tiene exactamente la densidad justa para detener la expansión en curso. La materia luminosa que los astrónomos pueden percibir da cuenta sólo del uno por ciento de esa densidad crítica.

Para que la materia oscura pueda intervenir en la formación de galaxias, debe estar formada por partículas que no interaccionen con la radiación electromagnética; se la conoce por materia oscura no bariónica. Quedan excluidos protones, neutrones y electrones. Los teóricos han propuesto una lista casi inacabable de partículas candidatas. Una por una, los experimentos de física de altas energías las han ido eliminando; ninguna se ha confirmado hasta la fecha.

La materia oscura fría presenta además otras dificultades. Algunos modelos cosmológicos que incorporan la materia oscura fría pueden explicar la formación de grandes cúmulos y supercúmulos de galaxias; otros pueden explicar la formación de galaxias individuales. Pero ninguno es capaz de explicar ambas cosas. Lo que constituye motivo sobrado para que ciertos cosmólogos la consideren un camelo.

Por otro lado, las cosmologías inflacionarias que poseen respuesta para preguntas fundamentales de la hipótesis de la gran explosión necesitan, como *conditio sine qua non*, que buena parte de la materia oscura sea no bariónica. (Un universo denso constituido sólo por materia ordinaria habría adquirido una composición completamente diferente de la observada.) Los estudios de las corrientes de galaxias en gran escala apuntan también a un universo dominado por la materia oscura no bariónica. Por consiguiente, si los teóricos abandonan sus partículas misterio, tendrán que idear otro mecanismo que obligue a las galaxias a formarse rápidamente.

De los labios de Huchra salen dos palabras que espantan a los teóricos: campos magnéticos. Los modelos cosmológicos en cartel no toman en consideración los campos magnéticos. Aunque pocos creen que el magnetismo tuviera mucho que ver con la formación de las galaxias, una minoría sonora, encabezada por Hannes Alfvén, continúa enarbolando esa bandera. J. Anthony Tyson, de AT&T Bell, experto en el cartografiado de materia oscura alrededor de los cúmulos galácticos, sospecha que la es-



LA LINEA DEL TIEMPO COSMICA traza un esbozo estilizado del modelo inflacionario de la gran explosión. El fondo de microondas observado por el COBE ofrece el vislumbre más temprano posible de las estructuras primigenias que con el tiempo evolucionaron para formar todos los objetos visibles en el cielo nocturno.

tructura cósmica se originó a través de un proceso patológico, quizás agujeros negros. Y siempre existe la posibilidad de que quede por descubrir algún mecanismo inédito.

Pegado el oído al fragor de tanta discrepancia, corremos el riesgo de no ver cuán lejos han avanzado las teorías cosmológicas desde el descubrimiento del fondo de microondas, hará pronto treinta años. Penzias recuerda que, cuando él empezó, no había ni un miserable punto de apoyo donde asir o corroborar las teorías.

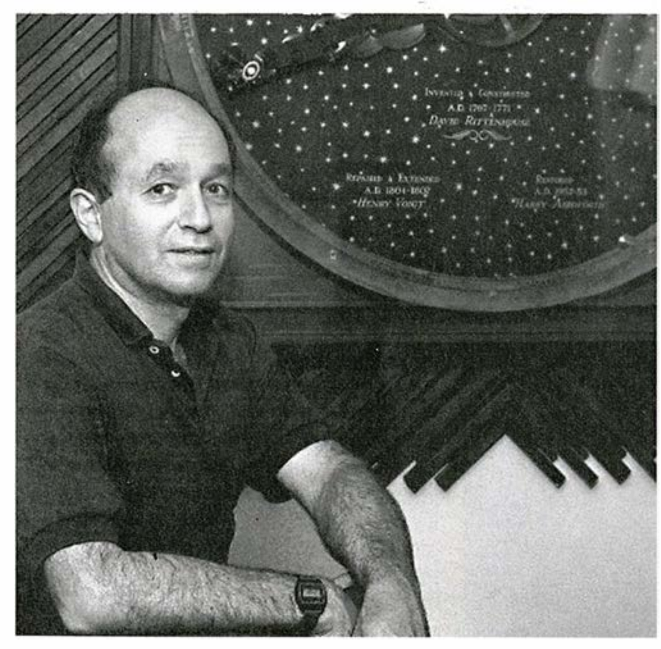
Pero el destino de la rica cosecha de hipótesis defendidas dependerá de mediciones más finas del fondo de microondas. Por culpa de su enorme campo de visión, las más pequeñas irregularidades detectadas por el COBE en el primitivo universo corresponden a características que exceden en tamaño a las mayores aglomeraciones de galaxias observadas en las exploraciones de cielo profundo que realicen los astrónomos. La inspección del cielo de microondas en busca de menores irregularidades (del tamaño de un minuto de arco) proporcionará información directa sobre el nacimiento de nuestras galaxias y cúmulos. De hecho, tales estudios están ya en curso desde hace algunos años, pero los astrónomos todavía no han encontrado irregularidad alguna en la temperatura del cielo.

Ahora que el COBE ha mostrado la magnitud de las variaciones de temperatura, otros investigadores tendrán una mejor idea de la sensibilidad que necesitan sus experimentos. Un equipo se halla analizando los datos de un telescopio de microondas transportado por globo y preparando otro lanzamiento para este otoño.

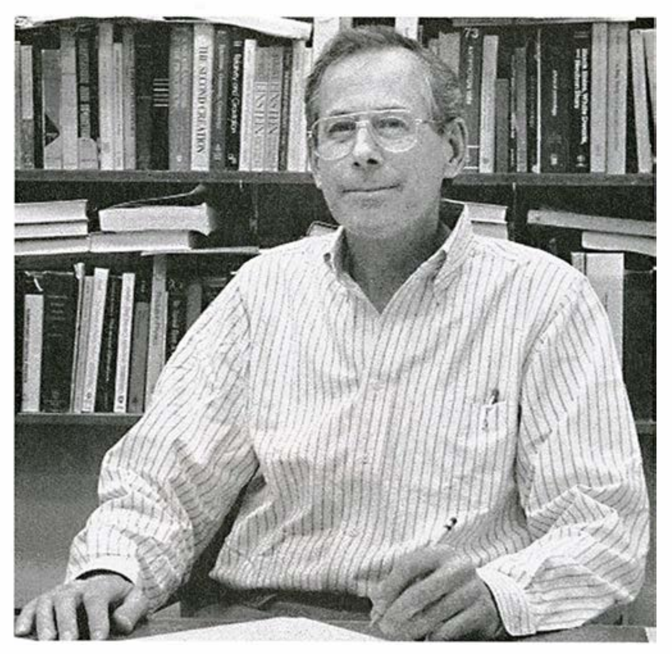
Mientras tanto, los científicos adscritos al COBE no se duermen en los laureles. Wright prometió que, para cuando el satélite concluya su misión en 1994, las mediciones de microondas contendrán mucho menos ruido, hasta el punto de permitir identificar directamente las fluctuaciones una por una.

¿Cómo quedará el rostro de la nueva cosmología? Aun cuando las mediciones del COBE parecen reforzar el supuesto de inflación y materia fría, se han ido formando grietas en el edificio intelectual. Recientes observaciones de la velocidad de expansión del universo apuntan a que los modelos inflacionarios pueden paradójicamente requerir que el universo sea más joven que los objetos que contiene. Los cosmólogos están considerando la adición de un segundo componente de materia oscura (llamada, de manera bastante lógica, materia oscura caliente) para apuntalar sus modelos de formación de estructuras.

Casi nadie duda de la validez de la gran explosión en sí. Por otra parte, nadie sabe cómo establecer una conexión directa entre las condiciones dominantes en los comienzos del origen cósmico y las dominantes hoy. El universo ha empleado miles de millones de años en escribir la historia de la creación. Sin duda los humanos estarán tratando de leerla todavía durante mucho tiempo.



JEREMIAH P. OSTRIKER aclama los descubrimientos del COBE, pero aconseja deslindar la interpretación cosmológica de otras. Foto: J. Levinson.



P. JAMES E. PEEBLES percibe una necesidad de ideas nuevas sobre el origen de la estructura cósmica. Foto: R. Matthews.

Arte paleolítico

Datación de Altamira

El arte rupestre paleolítico constituye uno de los fenómenos más interesantes para la investigación, ya que sus creaciones son de los pocos elementos de la vida cotidiana que nos han llegado de las sociedades cazadoras-recolectoras de nuestro pasado. Su estudio se ha venido basando en análisis estilísticos, sobre los que pesaba, irresoluble, el problema de la cronología precisa. La situación de la obra en el tiempo se realizaba por comparaciones entre santuarios y los restos de arte mobiliar o portátil, cuya edad era conocida por su situación estratigráfica o bien por su relación con el yacimiento arqueológico que se encontrara próximo en la misma cavidad. En algunos casos, las pinturas estaban recubiertas por sedimentos con restos arqueológicos, los que servían para ofrecer una fecha *post quem* respecto a las mismas.

Las dataciones radiométricas por ^{14}C quedaban excluidas, dada la cantidad de muestra necesaria (entre 10 y 20 gramos de carbono), que provocaría necesariamente la destrucción de las representaciones. Pero el aprovechamiento de las posibilidades ofrecidas por el espectrómetro de masas de acelerador, que separa y cuenta los isótopos de carbono, facilita la datación directa por radiocarbono de muestras de escasos miligramos de carbón vegetal.

La primera datación, del carbón incluido en el pigmento de un dibujo paleolítico de la cueva francesa de Coougnac, fue obtenida por un equipo del laboratorio de Gif-sur-Yvette. Fechada en hace 14.300 años, resultó ser más reciente que la inferida por comparaciones estilísticas. En 1990, un equipo de ese mismo laboratorio, encabezado por Hellène Valladas, e integrado además por varios prehistoriadores, nosotros incluidos, se aprestó a datar el arte rupestre en tres cuevas fundamentales: Altamira y Castillo, en Cantabria, y Niaux en el Pirineo francés. Se tomaron las precauciones necesarias en la recogida, transporte y conservación de muestras para evitar posibles contaminaciones y, por supuesto, sin alterar las pinturas.

Hubo que empezar por identificar la materia prima que empleaba el artista paleolítico. Los tres pigmentos habituales eran el trióxido de hierro, óxido de manganeso y carbón vegetal. A propósito de este último, Paloma Uzquiano, de la Universidad de Montpellier, demostró que procedía de una conífera, pino o enebro quizás. Los carboncillos no aparecían siempre en cantidades importantes, señal de una decisión selectiva por parte del dibujante, que no siempre empleó la madera que quemaba en su hogar.

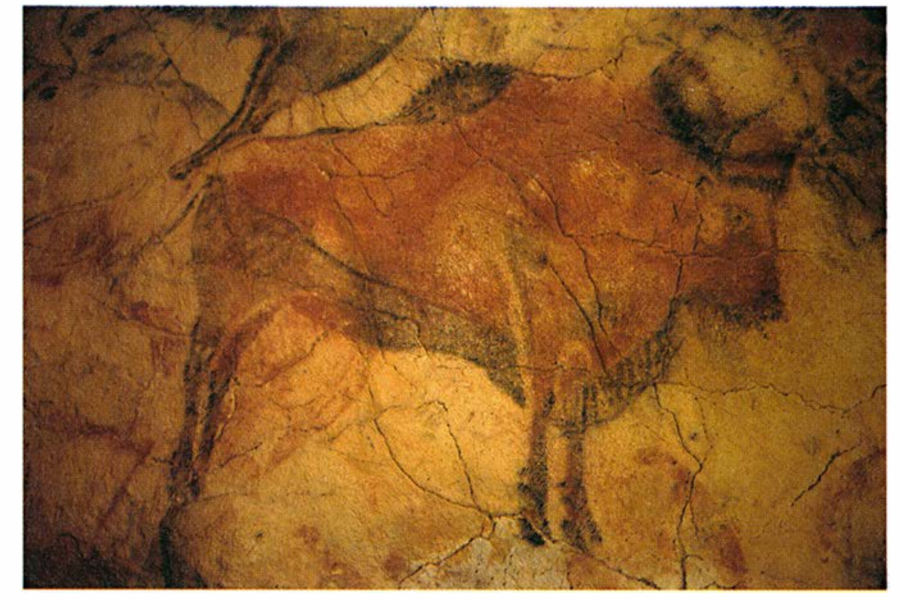
En la cueva de Altamira se recogieron muestras de tres figuras de bisonte de gran panel, dos procedentes de figuras polícromas y otra de uno de los pequeños bisontes del fondo del mismo. Las dataciones presentan una media de 14.000 años (antes de la actualidad) para el carbón vegetal y de 14.450 años para la fracción húmica (fracciones alcalinas solubles). Las fechas denuncian un momento más reciente que el que se venía aceptando.

El método de datación directa por radiocarbono se ha extendido a otras aplicaciones; en particular, a restos óseos. Se ha calibrado un fragmento de omoplato decorado con cabezas de ciervas, considerado del Solutrense, a tenor de criterios estratigráficos, por su descubridor Hermilio Alcalde del Río (1902). El interés de esta pieza ilustrada reside en su estrecha semejanza (en concepción y técnica) con figuras grabadas de las paredes del interior de la cueva, lo que apunta hacia una misma autoría. (Omoplatos parecidos, con cabezas de cierva y demás características, se han descubierto en El Castillo, El Juyo, El Cierro y otras cuevas, pero siempre en contextos del Magdaleniense Inferior Cantábrico, período durante el cual se realizaron las obras de arte de la cueva de Altamira.) A modo de comparación, se dataron dos huesos: uno del nivel Magdaleniense Inferior y otro del Solutrense. La fecha del omoplato se remontó hasta hace 14.480, con un error hacia arriba o hacia abajo de 250 años; esa fecha viene a coincidir con el hueso del nivel Magdaleniense y se aleja mucho de la pieza del Solutrense. (La datación por radiocarbono de los huesos corroboraba la deposición espacial de los omoplatos.)

Con el fin de contrastar las relaciones estilísticas de Altamira con un panel de polícromos de la cueva del Castillo, se procedió a datar dos figuras de bisontes de esta última cavidad. Los resultados se muestran coherentes (ambos en torno a los 13.000 años de antigüedad y alejados en un milenio del gran panel de Altamira).

Igualmente, la datación de una figura de bisonte de la cueva de Niaux (hace casi 13.000 años) ha resultado mucho más reciente de lo esperado y permite establecer relaciones entre dicha cueva y otra próxima, la de La Vache.

Indica, pues, todo ello que el arte rupestre acaba de entrar en una nueva línea de investigación, con métodos más fiables y objetivos, que acotan los límites cronológicos allí donde el carbón vegetal se usó de materia prima. Nos facultan también para precisar el tiempo de objetos artísticos, muchas veces recuperados fuera de contexto estratigráfico apropiado. El estudio del arte paleolítico cuenta ya con una poderosa herramienta, más segura. (Federico Bernaldo de Quirós, de la Universidad



LA DATACION DIRECTA por radiocarbano ha arrojado nueva luz sobre el momento en que se pintó este bisonte de la cueva de Altamira.

de León, y Victoria Cabrera Valdés, de la Universidad Nacional de Educación a Distancia.)

Plancton

A la vista, por fin

Los oceanógrafos se lamentan de la ubicuidad de un plancton que no pueden ver, constituido por diminutos vegetales y animales que tienden la base de las redes tróficas. Se conoce muy mal su densidad y distribución —en particular, si el plancton forma tapetes y agregados que sirven de alimento para los organismos marinos, incluidos los zooplanctónicos.

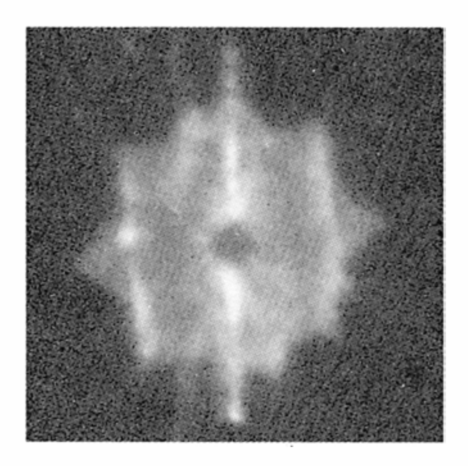
Pero el problema podría resolverse con un ingenio reciente, el videoregistrador de plancton (VRP), desarrollado por expertos del Instituto Oceanográfico de Woods Hole. ¿Revolucionará los métodos de estudio del plancton? Peter H. Wiebe, del departamento de biología de ese centro, reconoce que ni siquiera le iguala la vista desde un submarino. Remolcado desde el buque oceanográfico, el VRP ofrece a los ecólogos la posibilidad de observar los organismos en su ambiente natural.

Lo inventaron Cabell S. Davis y Scott M. Gallager. El aparato consiste en un estroboscopio de luz roja, sincronizado con los obturadores de cuatro cámaras de vídeo, cada una de las cuales está preparada para ampliar la imagen a distintos aumentos. La lámpara estroboscópica emite 60 destellos por segundo, lo que permite seguir organismos de movimiento rápido. El VRP está capacitado para captar animales cuyo tamaño esté comprendido entre menos de un milímetro y un centímetro.

No existe ninguna otra técnica que compita en esas magnitudes. Las redes amontonan los individuos recogidos en el muestreo, mezclando organismos de diferentes niveles de la columna de agua, y obscurecen la densidad relativa al transformarlo todo en una masa informe. Hasta las redes más refinadas, con cierre y apertura electrónicos, presentan problemas de destrucción de los animales frágiles. Cada técnica adolece de su talón de Aquiles: los contadores de partículas ópticos no registran las imágenes; los sistemas acústicos denuncian la densidad de plancton, pero no su composición.

El VRP se ganó a los biólogos desde los primeros escarceos. Davis, por ejemplo, logró distinguir la orientación del zooplancton, información que se pierde cuando se trabaja con redes. "Vimos muchísimos organismos que no pudimos identificar", señala. Revistió especial interés la observación de microagregados planctónicos, cuya existencia ha permanecido hasta ahora en el terreno de las hipótesis.

Su punto flaco reside en la exigüidad de la muestra explorable. Con el VRP sólo se registran pequeñas cantidades de agua, sin captura de organismos ni, por ende, posterior examen de los mismos. Davis y Gallager intentaron retener cuanto se fotografiara en una trampa; su empeño fracasó, pero les sirvió para evidenciar un fenómeno fascinante del zooplancton: la facilidad con que escapa. Con una talla de milímetros, huyen con una presteza inaudita, algo así, a nuestra escala, como si pudiéramos acelerar desde 0 hasta 3000 km por hora en un dieciseisavo de segundo, cuando detectamos a unos 20 metros un objeto de 20 metros que se acerca a 3000 km por hora.



ORGANISMO sin identificar descubierto con un videorregistrador de plancton.

El caballo de Troya

O la doble cara de algunas biomoléculas

Poco después de la medianoche del día 3 de diciembre de 1984, se produjo un escape de más de 30 toneladas de metilisocianato, un gas tóxico, en la fábrica de pesticidas que la empresa Union Carbide poseía en Bhopal, India. El gas reaccionó enérgicamente con la humedad de los tejidos expuestos de las personas que dormían en las cercanías, abrasándolas. Muchas víctimas murieron ahogadas al pasar los fluidos de su cuerpo a la luz de las vías respiratorias, también quemadas. Posteriormente, las lesiones respiratorias y las infecciones provocaron la muerte de muchos más. Fallecieron unas 3500 personas y decenas de miles más sufrieron graves lesiones por su exposición al metilisocianato.

Siete años después las autoridades médicas todavía siguen investigando el alcance de las lesiones en los supervivientes. Algunos médicos han observado que, aparte de las quemaduras obvias producidas en pulmones y ojos, muchos pacientes presentan alteraciones inexplicables en los sistemas cardiovascular, gastrointestinal, neuromuscular, reproductor e inmune.

Los supervivientes sufren lesiones en órganos que, en teoría, no deberían haberse afectado en la exposición al gas. Algunos químicos sospechan que el glutatión, péptido que protege a las células de posibles lesiones químicas, potenció el efecto de la toxina. Las últimas investigaciones en este campo están poniendo en entredicho la reputación del glutatión: en ocasiones, podría actuar como un caballo de Troya, transportando los tóxicos hasta el interior del organismo.

En un principio, las autoridades sanitarias asumieron de forma general que el metilisocianato era demasiado reactivo para penetrar en el interior de los tejidos de las víctimas de Bhopal. Sin embargo, en 1988, dos grupos de trabajo, dirigidos por Yves Alarie, de la Universidad de Pittsburgh, y B. K. Bhattacharya, del Departamento de Investigación en Defensa y Desarrollo de la India, demostraron, cada uno por su cuenta, que el producto sí se adentraba en los tejidos. Cuando animales de laboratorio inhalaban metilisocianato marcado radiactivamente, las moléculas pasaban con presteza a la sangre, orina y bilis y continuaban circulando por todo el cuerpo durante varios días.

¿Cómo se desenvolvía el tóxico por entre los tejidos sin reaccionar con ellos? Thomas A. Baillie, de la Universidad de Washington, y J. Greg Slatter, de la Compañía Upjohn en Kalamazoo, piensan que el metilisocianato podría unirse al glutatión, que abunda en la mucosa tapizadora de los pulmones. El glutatión ayuda a las células en la limpieza de radicales reactivos y otros compuestos peligrosos, a los que se une. La molécula conjugada resultante es barrida al exterior y excretada.

El glutatión también se une al metilisocianato, asegura Baillie, pero lo hace de manera reversible. En Bho-

pal, el glutatión podría haber transportado cierta cantidad de metilisocianato fuera de los pulmones y haberla liberado en el interior del organismo, donde el tóxico habría actuado atacando a los tejidos adyacentes y produciendo las múltiples alteraciones observadas.

Baillie y Slatter han llevado a cabo experimentos que apoyan esta hipótesis. Han demostrado que animales a los que se inyecta metilisocianato lo excretan conjugado con el glutatión. En el tubo de ensayo, han demostrado también que el compuesto conjugado se puede separar bajo ciertas condiciones fisiológicas y que el metilisocianato así liberado degrada membranas y proteínas celulares. Se da por descontado que el metilisocianato entra en contacto con el glutatión, pero se desconoce si, una vez formado el compuesto, pasa de los pulmones a la sangre.

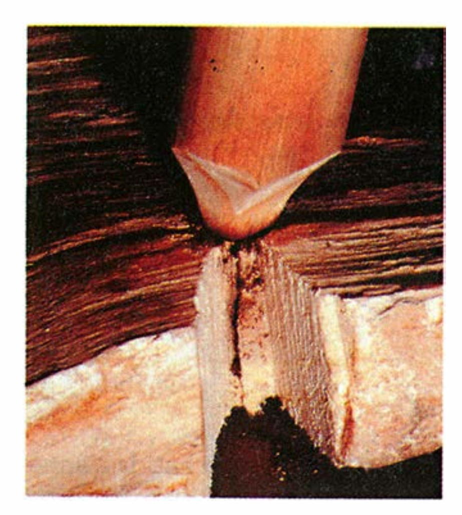
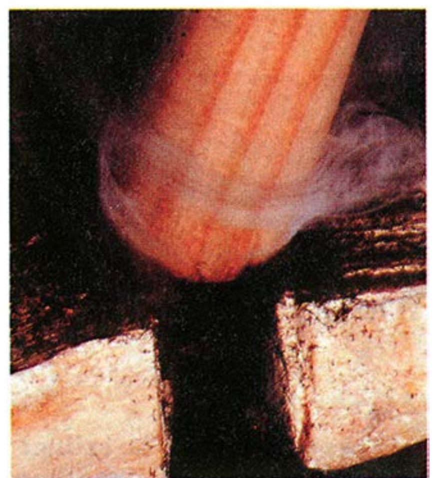
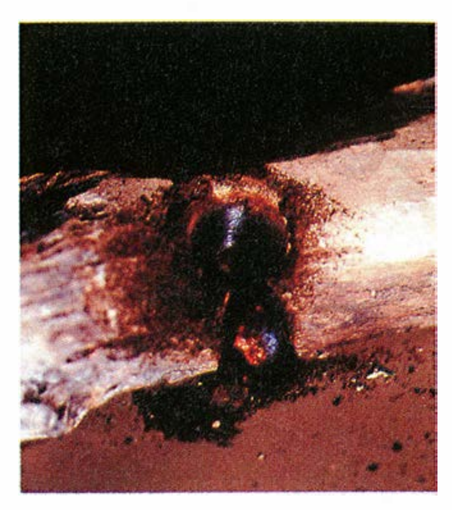
"Baillie se ha acercado más que nadie a la demostración de esa posibilidad fisiológica", explica William E. Brown, de la Universidad Carnegie Mellon, quien ha consagrado veinte años al estudio de las propiedades del metilisocianato. Pero los bioquímicos todavía debaten si el metilisocianato conjugado se descompone en el interior del cuerpo y con qué consecuencias.

Aunque las investigaciones de Baillie plantean una buena hipótesis de trabajo, señala Brown, podrían entrar en juego mecanismos alternativos. Por ejemplo, las vías metabólicas pulmonares encargadas de detoxificar los contaminantes podrían transformar el metilisocianato en radicales con una vida media más prolongada y entrar en la sangre. Esas reacciones convierten algunas sustancias en carcinógenos.

Nacimiento del fuego

Los útiles

Desde hace más de cuatrocientos mil años, los hombres han dominado el fuego. Saben encenderlo desde hace, al menos, diez mil años. Los estudios sobre los vestigios de los métodos de encendido se hallan erizados de dificultades debido a la pésima conservación de la madera. Gracias a la arqueología del Neolítico sabemos que el hombre empleaba instrumentos de fuego. El mito de este elemento ha dado nacimiento a tesis erróneas, como la de que los hombres del Neolítico encendían fuego frotando dos piedras de sílex; pero las chispas que se producen,

CUANDO SE HACE GIRAR LA BROCA colocada en la punta de la ranura (izquierda) *aparece humo* (centro) *y la brasa acumulada* (derecha) *sirve para encender el fuego.*

fugaces y débiles en extremo, no logran prender en ramitas o trapos. Se sugirió también que el fuego surgió al frotar una madera dura contra una madera blanda, una madera verde contra una madera seca, una madera sana contra una madera podrida. Un estudio reciente ha desmentido estas hipótesis.

La técnica que se ha analizado consta de cuatro elementos: una broca, una tablilla, una placa de apoyo y un arquillo. La broca es un palo largo de unos treinta centímetros afilado en ambos extremos; el extremo superior está en contacto con la placa de apoyo y debe girar con el menor rozamiento posible, mientras que el extremo inferior descansa sobre la tablilla. La placa de apoyo mantiene el taladro en su sitio sobre la tablilla, y es por ejemplo una concha o un hueso. El arquillo suele ser de madera semirrígida; entre sus dos extremos se fija una cuerda que se enrolla alrededor de la broca: se imprime un movimiento de traslación horizontal al arquillo que transmite un movimiento de rotación a la broca.

La tablilla necesita algunos preparativos: espesor de 1,5 a 2 centímetros, practicándose en ella una muesca de sección triangular que abarca todo el diámetro, y situada la punta de esta sección en el centro de la tablilla; cerca de esa punta se ahueca una cúpula donde se ceba el fuego. Se hace girar la broca cuyo extremo inferior descansa sobre la cúpula y cuyo extremo superior lo mantiene la placa de apoyo que se sostiene en la mano izquierda. El operador actúa sobre el arquillo: aparece un hilo de humo y cae un poco de serrín carbonizado en el diedro de la ranura. Entonces se aumenta ligeramente la velocidad de rotación de la broca: el humo alrededor de la punta de la broca se hace más espeso y el serrín carbonizado se amontona en la ranura. Se debe mantener la rotación hasta que el montón de serrín se pone a echar humo.

De la masa de polvo carbonizado se escapa un poco de humo al que se aventa suavemente con el fin de obtener una brasa (cuyas dimensiones son las de la punta de un cigarrillo). Para encender un fuego se deposita esta brasa sobre un puñado de paja, de hierbas secas o de líquenes sobre los que se sopla.

Los autores han experimentado con diversas combinaciones de madera para comprobar si eran fundadas las "recomendaciones" tradicionales. Han trabajado con veinte clases de madera, cuya dureza se ha medido en la Universidad de Ingeniería Mecánica de Burdeos: esta dureza se puede evaluar midiendo la magnitud de la impresión de un cilindro de acero que descansa sobre una de las caras de una probeta de madera, estando sometido a una fuerza conocida durante un tiempo determinado. Los investigadores han realizado doscientas pruebas de ignición, combinando maderas blandas y blandas, duras y duras, duras y blandas.

De todo ello han deducido que la dureza de las maderas no tiene ninguna influencia sobre la ignición y que los resultados no son mejores cuando se utilizan dos clases diferentes de madera; es más: ni la densidad ni la porosidad modifican la facilidad de ignición, aunque se extrae mejor el serrín de una madera blanda y homogénea que de una madera dura.

Los experimentos han demostrado que, desde los primeros giros de la broca, se podía prever el éxito o el fracaso del ensayo según la calidad del serrín que sale de la ranura. En los casos más favorables (hiedra, laurel o tilo), es fino, homogéneo y forma copos; este aspecto depende de la presencia o ausencia de fibras microscópicas que deben ser suficientemente finas y largas para agruparse en madejas aireadas y combustibles. Las peores maderas (encina o avellano) proporcionan fibras cortas, masivas, lignificadas e incombustibles: con este tipo de fibras el fracaso está casi garantizado.

Las prestaciones de las maderas de encendido van ligadas a la naturaleza de las fibras. A partir de la bibliografía etnográfica han establecido un inventario de los vegetales de uso tradicional en ese tipo de encendido del fuego. Las plantas se clasifican en un número limitado de familias botánicas de las cuales algunas se utilizan en varios continentes. Se trata, en su mayoría, de plantas textiles de fibra larga: tilo, yute o hibisco. Desde hace mucho tiempo, además, se emplearon encendedores de sílex y de yesca; así pues, los serrines de las maderas eficaces, aglomerados microscópicos de fibras celulósicas largas, se parecen mucho a la yesca tradicional extraída, por raspadura, de los tejidos internos de un hongo, *Ungulina fomentaria*.

El dispositivo de encendido por fricción produce a la vez energía de frotamiento, transformada en calor, y un sucedáneo de yesca. Las maderas blandas facilitan la producción de serrín, que es eficaz cuando contiene muchas fibras largas y finas que forman una pelusa; esta brasa basta para la ignición, que necesita unos veinte segundos en el mejor de los casos.

De cerca

Fotos y texto: Satoshi Kuribayashi

Acrobacia aérea

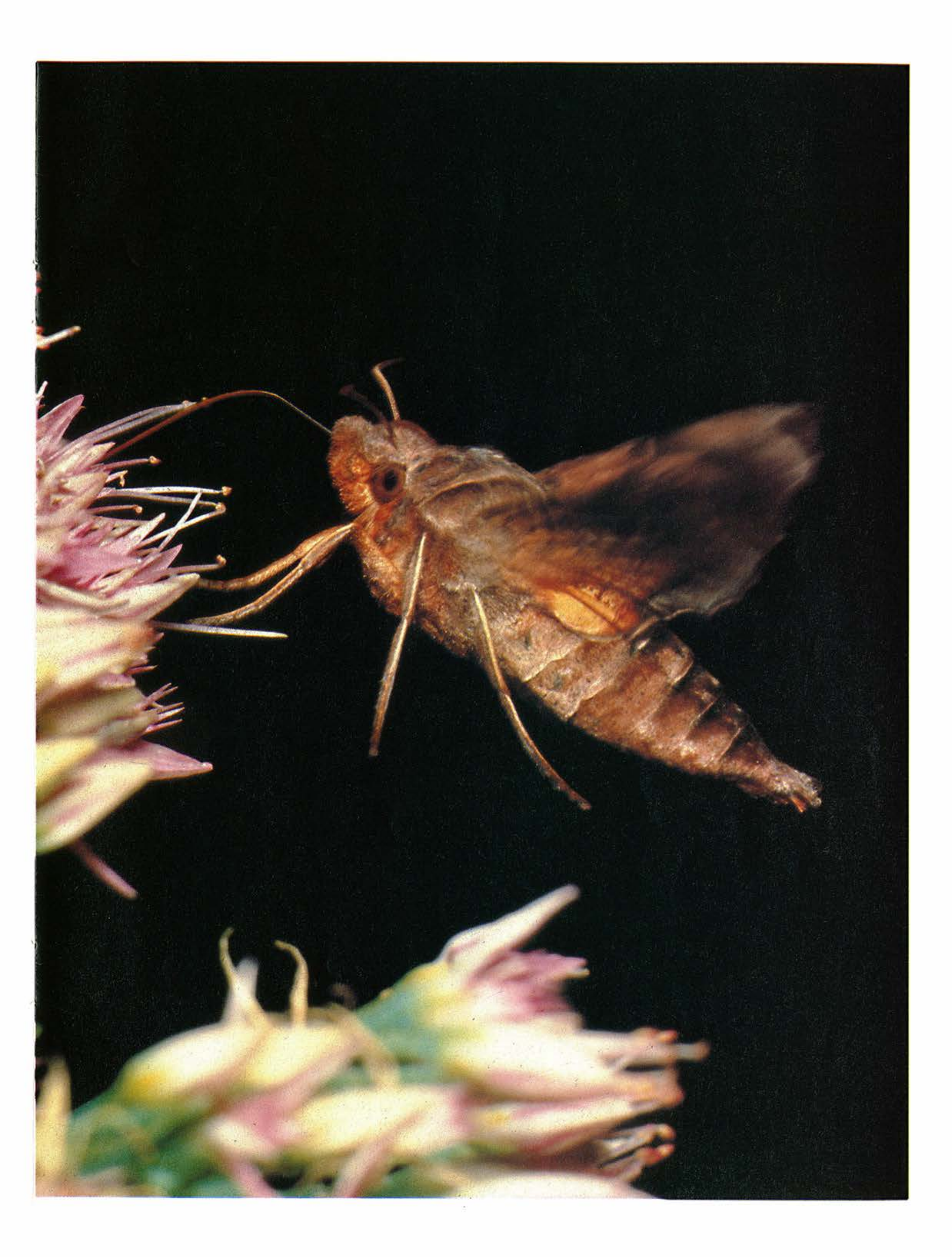
La estampa de la esfinge resume la belleza con que los animales llevan a cabo los procesos naturales, en este caso la libación del néctar. Del millar y medio de especies de esfíngidos que existen, una de las más hermosas es la *hoshihime hozyaku*, endémica del Japón. Deben su nombre mitológico a la cabeza y el tórax, que mantienen erguidos durante la fase de oruga.

Esta familia se caracteriza por la variabilidad de su tamaño y actividad (nocturnas y diurnas). Miden de uno a veinte centímetros de envergadura alar y presentan un cuerpo robusto y fusiforme. De alas poderosas, son largas y estrechas las anteriores, que les confieren extraordinaria habilidad aerodinámica. La espiritrompa distintiva llega a alcanzar hasta los 25 centímetros. A diferencia de otros lepidópteros de la misma familia que suelen especializarse en una planta o árbol determinado (esfinge del pino, esfinge del tilo, del álamo o del roble), esta mariposa diurna se alimenta de flores diversas a lo largo del día.

Hoshihime hozyaku mantiene firme y seguro el cuerpo mientras liba el néctar, con las dos patas anteriores fijas en la flor. Permanece en cada planta de uno a diez segundos.

distancia focal: 100 mm
diafragma: F = 22
exposición: 1/1000 de segundo
película: ISO = 100





Puntos ciegos

La investigación de las compensaciones con que el sistema visual llena vacíos en la percepción ayuda a aclarar la forma en que procesa imágenes el cerebro

Vilayanur S. Ramachandran

Edme Mariotte, científico francés del siglo XVII, al efectuar la disección de un ojo humano se percató del disco óptico, zona de la retina donde el nervio óptico se inserta en el globo ocular. También cayó en la cuenta de que, a diferencia de otros componentes de la retina, el disco no era sensible a la luz. Valiéndose de sus conocimientos de óptica y de anatomía ocular, Mariotte dedujo que todo ojo habría de ser ciego en una pequeña porción de su campo de visión.

El lector puede confirmar fácilmente la conclusión de Mariotte examinando la ilustración al pie, donde se muestra un disco azul sobre fondo de color amarillo-anaranjado. Cierre el ojo derecho y sostenga la página frente a sí, a unos treinta centímetros de distancia. Concéntrese en el cuadrado y vaya acercando lentamente la ilustración hacia su ojo izquierdo. A una distancia crítica, el disco caerá dentro del punto ciego del ojo y desaparecerá por completo. La verdad es que el disco se percibe como si estuviera cubierto por el color de fondo. Este proceso visual se denomina relleno.

Los psicólogos comenzaron hace poco a darse cuenta de que el fenómeno de relleno constituía una manifestación de un mecanismo más general de percepción, conocido por interpolación superficial. Cuando miramos una mesa, sea por caso, parece verosímil que el sistema visual procede a extraer información relativa a sus bordes y a crear una representación mental, similar a la imagen de una mesa dibujada en una viñeta. El sistema visual podría entonces valerse de un proceso de interpolación superficial para rellenar la mesa de color y textura. Merced a tal proceso, el sistema visual podría evitarse la pesada tarea computacional de crear una representación detallada de los colores y texturas de la superficie.

VILAYANUR S. RAMACHANDRAN es profesor del programa de neurociencias y catedrático del departamento de psicología de la Universidad de California en San Diego. Se graduó en medicina en la Universidad de Madrás; amplió estudios y se doctoró en el Trinity College de Cambridge.

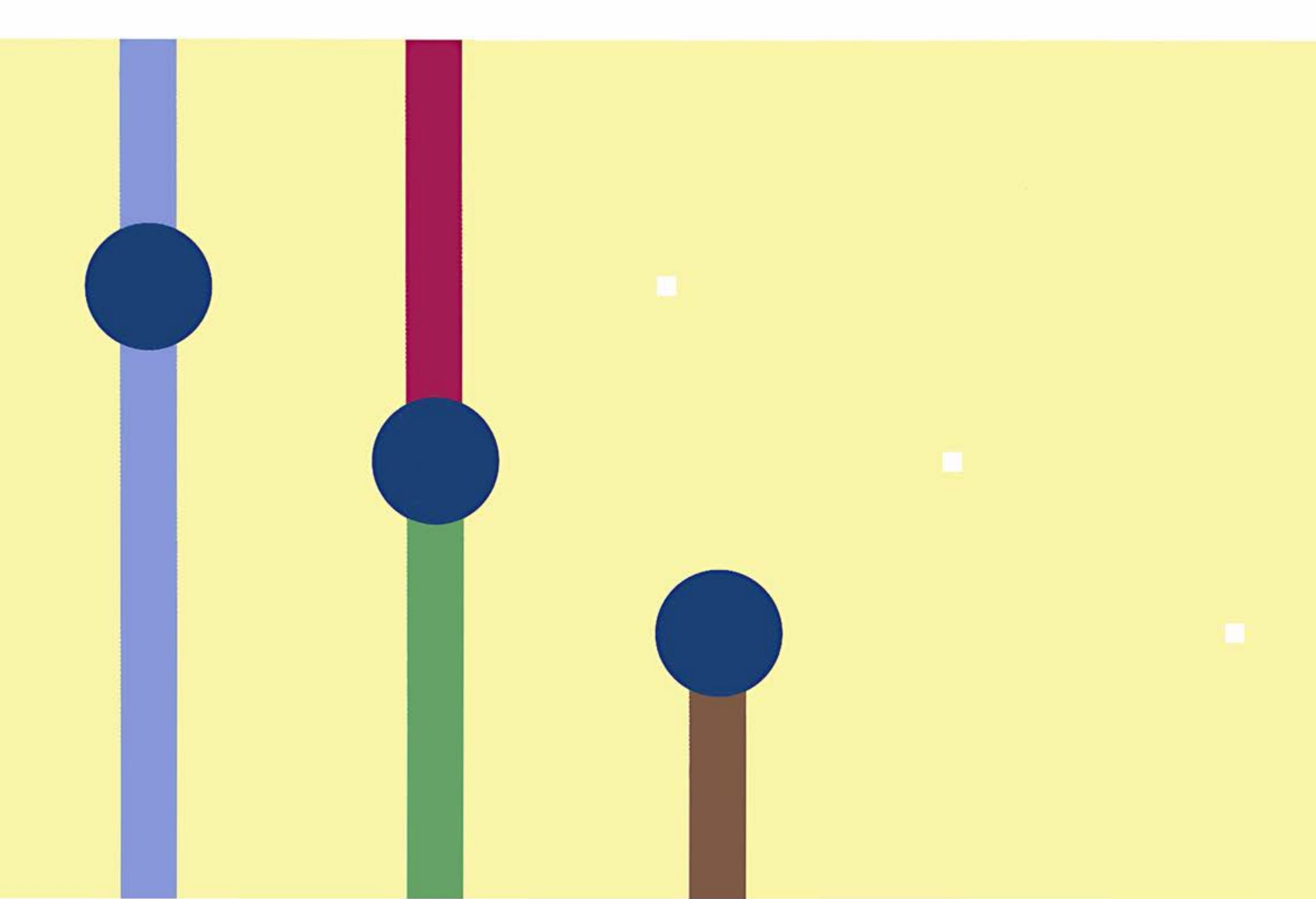
Para comprender de qué forma el cerebro interpola la información visual, el autor y sus colegas de la Universidad de California en San Diego han efectuado muchos experimentos encaminados a estudiar la percepción en el punto ciego. Las ilustraciones de este artículo ofrecen al lector oportunidad de ensayar algunos de tales experimentos. Para enriquecer nuestro análisis hemos investigado también dos tipos de puntos ciegos "artificiales". En primer lugar, hemos desarrollado una técnica inocua para inducir puntos ciegos de corta duración. Pudimos, por otra parte, examinar a varios individuos que padecían escotomas, regiones de ceguera provocada por lesiones en zonas minúsculas del cerebro. El trabajo nos ha permitido descubrir muchas características del proceso de relleno y nos ha allanado el camino para comprender la relación entre el relleno y otros procesos visuales, como la detección de perfiles y la percepción del movimiento.

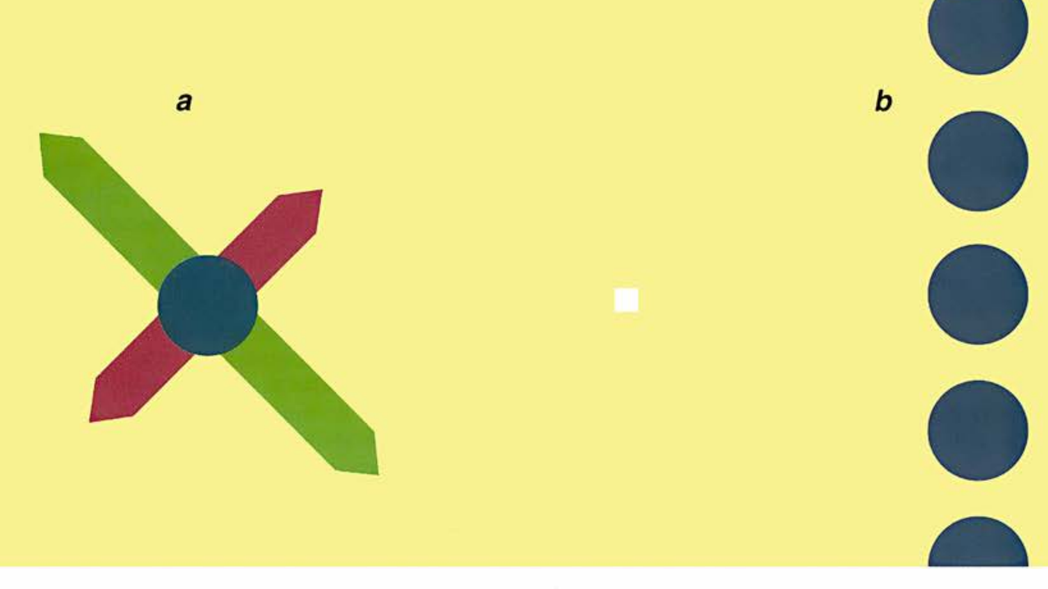
Es hecho conocido en psicología desde hace tiempo que, al echar un vistazo a un objeto, se forma una representación perceptual del mismo en las zonas de visión de nuestro cerebro. El cerebro se vale, en cambio, de una muy otra estrategia para seguir la pista de los objetos que caen fuera del campo visual, como los situados tras la cabeza. Para tales objetos, el cerebro crea lo que podríamos llamar una "representación conceptual", algo similar a una inferencia lógica. No se trata de mera disquisición semántica; es probable que las representaciones perceptual y conceptual se generen en distintas regiones del cerebro y sean procesadas de muy diferente forma.

¿Qué riqueza posee la representación perceptual en la región correspondiente al punto ciego? Para abordar esta pregunta solicitamos de voluntarios que examinasen una serie de figuras simples. Comenzamos por una línea interrumpida por un disco [*véase la figura 1*]. Cuando un voluntario orientó su punto ciego de forma que cubriera el disco, la recta le pareció continua en cuanto a forma y color. Se confesaron observaciones similares cuando exhibimos un segmento vertical cuya mitad superior era roja y cuya mitad inferior era verde, con un disco que cubría la zona de encuentro de una y otra. Los sujetos experimentales señalaron que, cuando el disco caía en el punto ciego, la línea ofrecía un aspecto continuo a pesar de que, paradójicamente, no podían ver la divisoria entre los segmentos verde y rojo. La paradoja nace, presumiblemente, de que parte del sistema visual está haciendo señales de que la línea es continua, mientras otra parte es incapaz de discernir la divisoria entre los colores verde y rojo.

Con el fin de verificar si el sistema visual alcanzaría a rellenar figuras más complicadas, mi esposa, Diane Rogers-Ramachandran, y yo ideamos diversas configuraciones, entre ellas, la similar a una rueda de bicicleta [*véase la figura 3*]. Cuando el punto ciego es orientado al cubo de la rueda, se obtiene la impresión de que los radios convergen en un punto, en el centro del punto ciego.

1. DESAPARECERA EL DISCO (*página contigua*) cuando se sitúe en el punto ciego del ojo. Cierre el ojo derecho y mantenga la página a unos 30 centímetros de distancia. Concentre la mirada en el cuadradito blanco y vaya acercando lentamente la página hacia el ojo. Al llegar a cierto punto, el disco desaparecerá, sustituido por el color de fondo. Si los discos de la figura al pie caen en su punto ciego, quedarán rellenos. La recta de la izquierda parecerá completa. También la recta central semejará continua, pero el color de la región rellena no debería ser discernible. En la figura de la derecha, el segmento rectilíneo no penetrará en el punto ciego.

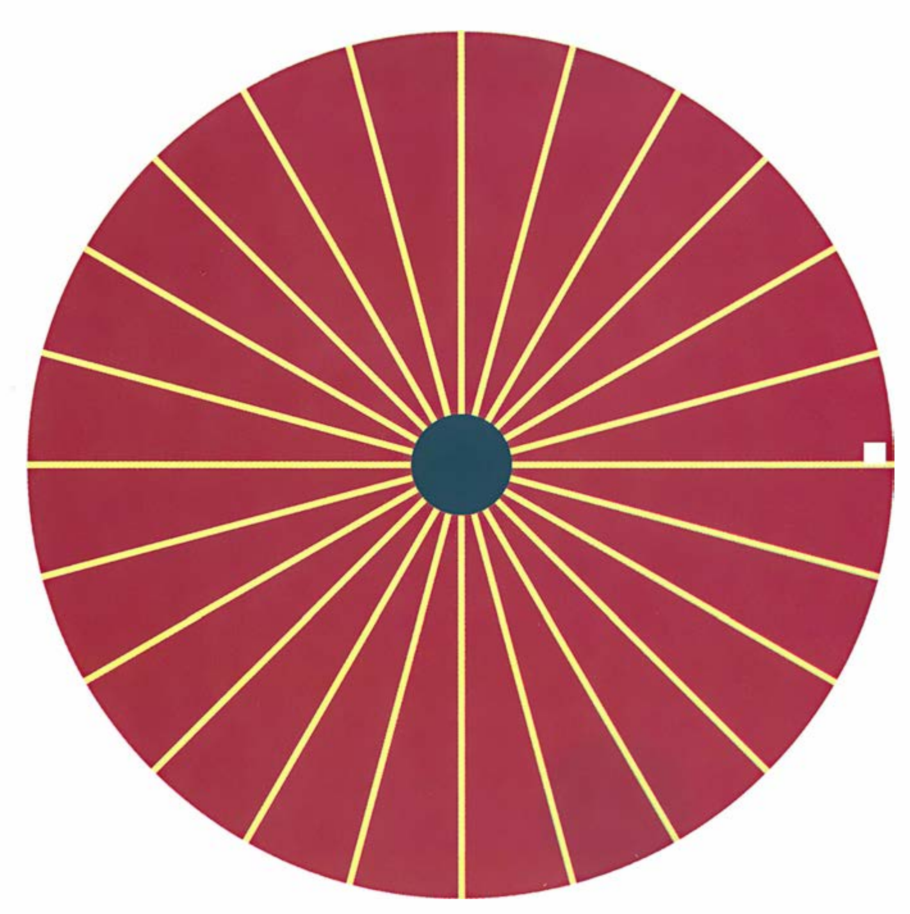




2. EL PROCESO DE RELLENO asociado al punto ciego constituye una función visual muy refinada. Cuando el punto ciego cae en el centro de una cruz (*a*), únicamente el segmento más largo parece hallarse entero. En el caso de una configuración de lunares (*b*), la mancha ubicada en el punto ciego desaparece en el fondo. En la ilustración *c* los segmentos horizontal y vertical están desalineados; ahora bien, cuando el disco se sitúa en el punto ciego, la línea vertical parece continua y recta, pero la horizontal parece desalineada. También el movimiento influye en las percepciones asociadas con el punto ciego. Al saltar adelante y atrás entre la ilustración *d* y la correspondiente de la figura 4, la línea parece moverse oblicuamente. Mas, si orien-

Se nota un efecto parecido cuando el centro de una gran X cae sobre el punto ciego. La X parece entera. Mas, curiosamente, si uno de los brazos que componen la X es más largo que el otro, sólo el mayor de ambos da la impresión de hallarse completo [*figura 2*]. Tal resultado induce a pensar que el proceso de relleno puede ser influido por estímulos visuales bastante alejados del punto ciego.

También nos fue posible demostrar que el relleno no es "cognitivo", esto es, no está basado en expectativas del probable aspecto de las cosas. Hemos generado, por ejemplo, una imagen consistente en una columna vertical de gruesos lunares, uno de los cuales fue ubicado dentro del punto ciego [*figura 2*]. Todos los sujetos vieron esfumarse tal lunar; no elaboraron ninguna "alucinación" del punto ausente a fin de preservar la configuración.

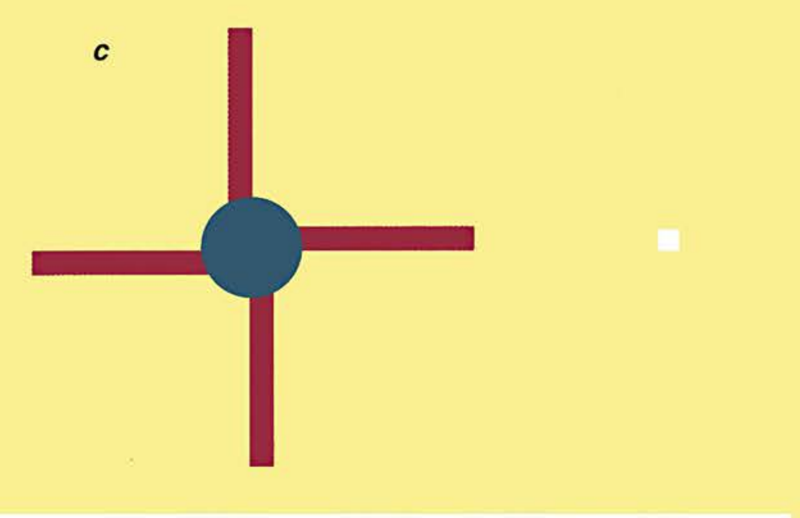


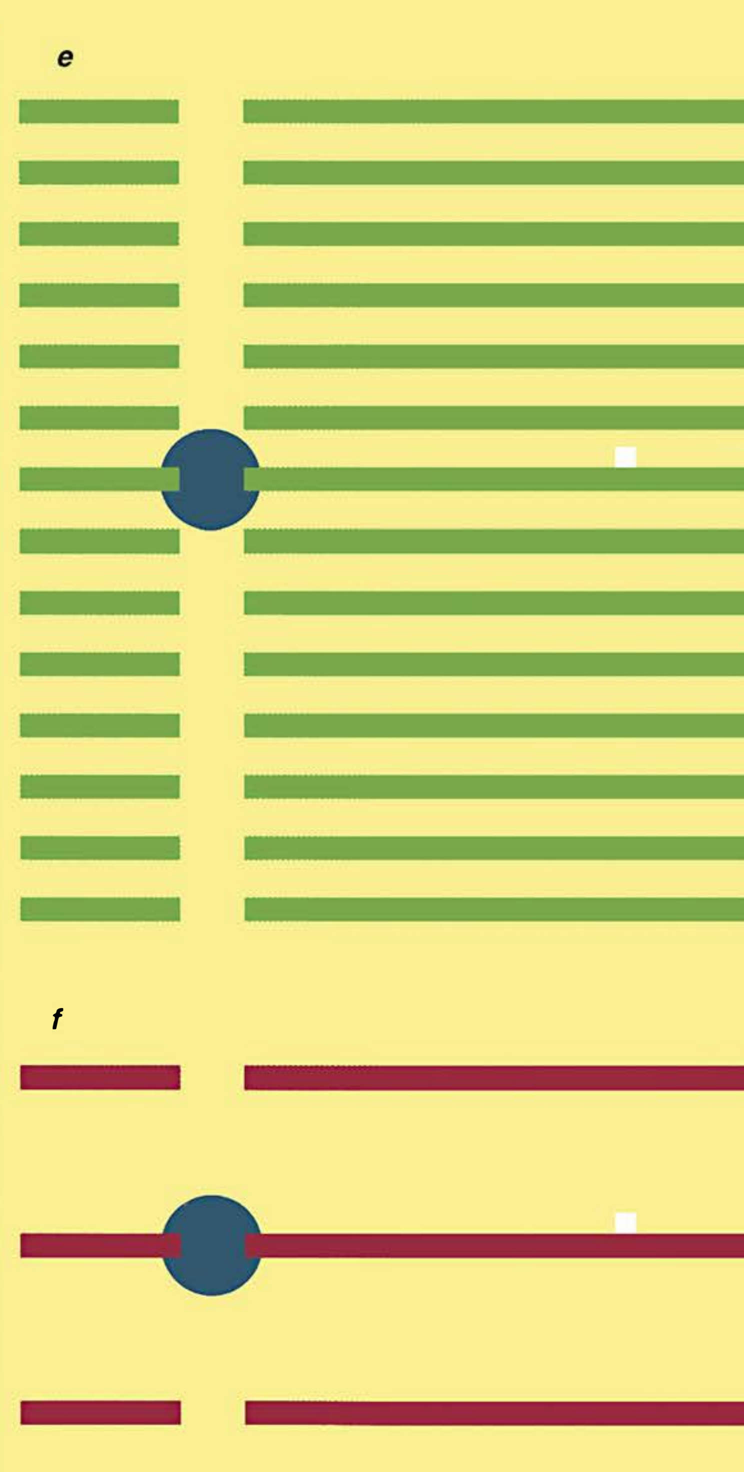
3. CONFIGURACION EN RUEDA:
se completa cuando el disco cae dentro de un punto ciego.

Uno de los resultados más interesantes nos llegó cuando experimentamos con contornos ilusorios. El sistema visual los genera cuando el ojo registra ciertas series de perfiles incompletos o de líneas fragmentadas. Con este fin preparamos una imagen consistente en varias líneas horizontales sobre fondo de color. Cada línea tenía un pequeño vano cerca de un extremo, más o menos a un tercio de la longitud de la línea. El sistema visual no se limita a interpretar la imagen como una mera serie de líneas fragmentadas, sino que produce también dos contornos ilusorios que definen una banda vertical.

Cuando les pedimos a los voluntarios que situasen su punto ciego sobre una interrupción de las líneas horizontales, la mayoría afirmó que la banda vertical no se interrumpía al atravesar el punto ciego y que la línea horizontal continuaba fragmentada. Empero, cuando eliminamos de la figura todas las rectas menos tres, la línea que corría a través del punto ciego parecía hallarse completa. Por consiguiente, el relleno parece depender de que los contornos ilusorios se hallen bien definidos.

Los científicos pueden deducir ciertos aspectos básicos del proceso





tamos nuestro punto ciego al vano y después se salta de una página a otra, la línea sólo se moverá verticalmente. En la ilustración *e*, los contornos subjetivos dan la ilusión de una banda vertical alojada entre varias rectas horizontales. Si la banda vertical no está bien definida (*f*), será la horizontal que cae dentro del punto ciego la que resultará rellena, y no la vertical.

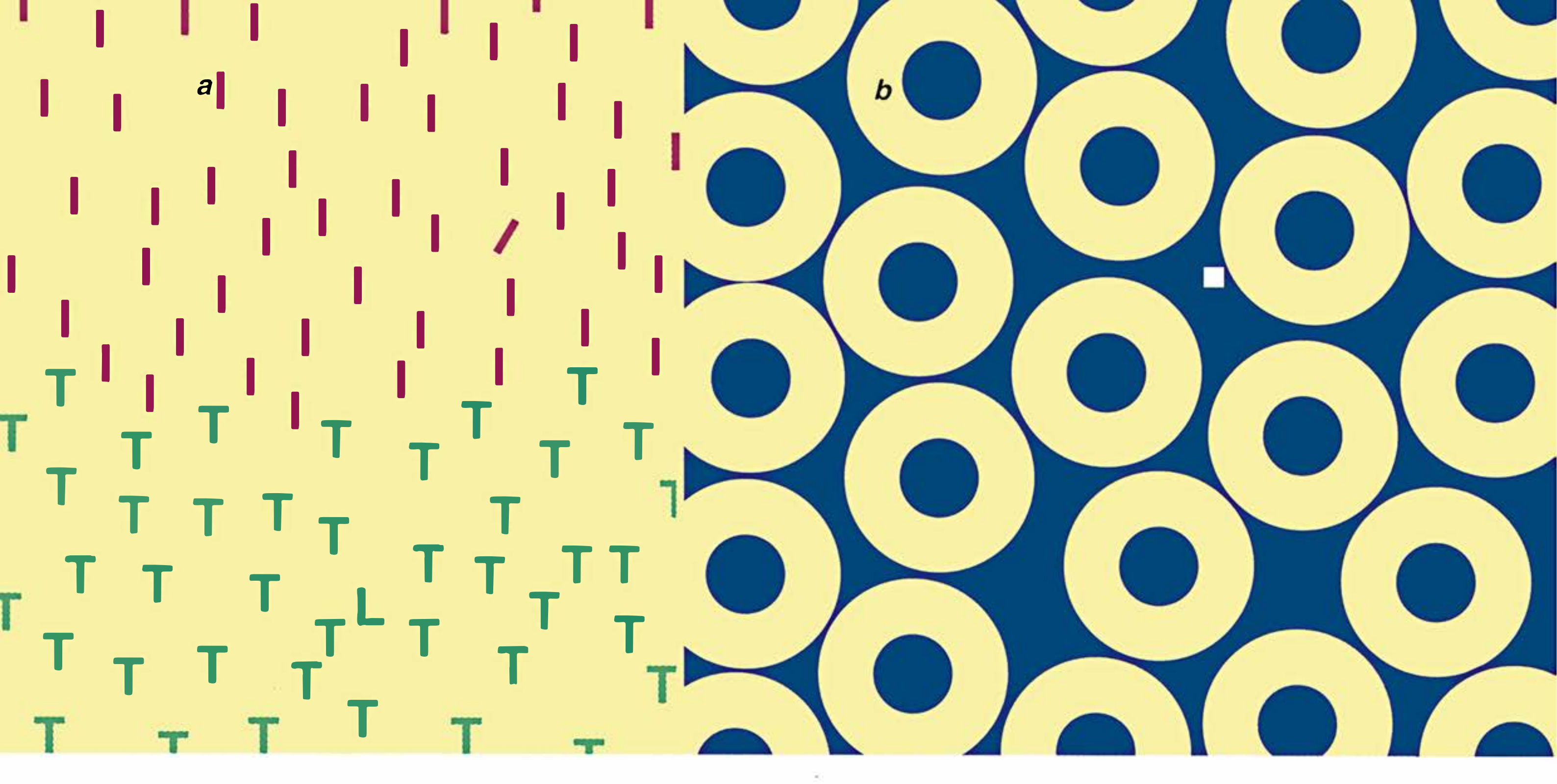
de relleno tras decenios de acumulación de conocimientos sobre la fisiología del sistema visual. Ante todo, las células fotosensibles de la retina traducen a impulsos eléctricos la intensidad y el color de la luz, impulsos que el nervio óptico transmite al cerebro. Concretamente, los impulsos alcanzan una capa de neuronas ubicadas en la corteza visual primaria. Las neuronas de esta región clasifican la información visual y la retransmiten a varias otras áreas, especializadas cada una, al parecer, en un tipo particular de procesamiento visual, como el color, el movimiento y tal vez la forma.

Desde 1987, mis colaboradores y yo nos hemos esforzado en determinar si el proceso de relleno se produce antes, durante o después de otros tipos de procesamiento visual. Empezamos con un tipo de proceso que genera un efecto perceptual conocido por resalte o realce. El sistema visual propende a dirigir la atención hacia ciertos rasgos del entorno visual, los llamados rasgos elementales. A causa de su color o su orientación, tales rasgos destacan conspicuamente al presentarlos junto a muchas otras figuras que podrían desviar la atención. Ciertos psicólogos habían sugerido que el fenómeno de realce sólo puede darse para peculiaridades extraídas en fases relativamente tempranas del proceso de visión.

Mis colaboradores y yo nos planteamos si el proceso de relleno acontecía antes o después del proceso responsable del resalte. Para resolver la cuestión, preparamos un figura compuesta por varios anillos y solicitamos a los voluntarios que ubicasen el centro de uno de los anillos en su punto ciego [*véase la figura 4*]. Vale la pena anotar que los sujetos comentaban que el anillo circundante del punto ciego quedaba relleno y transformado en un disco homogéneo. Señalaron también que tal disco resaltaba de los demás.

Dos importantes consecuencias emanan de esta observación. Primera, el proceso de relleno tiene que producirse en fase muy temprana del procesamiento visual, dado que precede al resalte. Y segunda, el relleno forzosamente ha de comportar la generación de una representación perceptual. De no formarse tal representación, los sujetos no podrían experimentar el realce.

Posteriormente, examiné con William Aiken la relación



4. LA LINEA OBLICUA destaca mucho en un campo de trazos verticales; en cambio, una L inmersa en un campo de Tes resulta algo más difícil de localizar. El trazo oblicuo destaca tanto a causa de un proceso perceptual conocido por realce. Análogamente, en la ilustración *b*, al situar el centro de uno de los anillos en el punto ciego el anillo quedará relleno y resaltará sobre los otros. Si el lector clava la mirada en el cuadrado de la ilustración *c* durante algunos segundos, los colores rellenarán el disco desde ambos lados.

entre relleno y detección de movimiento, proceso que se sabe tiene lugar en uno de los primeros estadios del procesamiento visual. Sacamos partido de la conocida ilusión de movimiento aparente. Al mostrar en rápida sucesión, una tras otra, dos líneas paralelas idénticas, el cerebro tiende a percibir una sola línea en movimiento. Tanto así, que es la ilusión de movimiento aparente la que nos permite percibir movimiento continuo cuando se proyectan en rápida sucesión los fotogramas de una película cinematográfica.

Diseñamos para nuestros experimentos dos figuras, cada una de las cuales contenía una línea interrumpida por un pequeño vano [*véanse los apartados d de las figuras 2 y 4*]. Dispusimos los huecos de manera que, al mostrar las figuras en rápida sucesión, el vano pareciera desplazarse oblicuamente. Para empezar, le presentamos a un sujeto la primera imagen y le pedimos que orientase su punto ciego hacia el hueco. Cuando comentó que la línea parecía completa, la apagamos y proyectamos un destello con la segunda imagen, en la cual el vano estaba desplazado. Nosotros habíamos esperado que, si el relleno fuese posterior a la detección del movimiento, el individuo continuaría viendo movimiento oblicuo. Pero la verdad es que explicó que las líneas parecían moverse verticalmente. Estos y otros experimentos nos han llevado a concluir que el proceso de relleno antecede a la detección del movimiento.

La observación cuidadosa del punto ciego puede resultar difícil, debido a que tal punto se encuentra siempre en la periferia del campo de visión del ojo. En nuestros esfuerzos por superar esta dificultad, Sir Richard Gregory, de la Universidad de Bristol, y el autor han descubierto un método inocuo para inducir un punto ciego artificial cercano al centro del campo de visión del ojo.

El lector puede realizar nuestros experimentos en su propio hogar, sirviéndose del receptor de televisión. Elíjase un canal vacío, desintonizado, para que la pantalla se cubra de "nieve", una configuración aleatoria de puntos centelleantes. Péguense después una etiqueta circular muy pequeña hacia el centro de la pantalla, y a unos ocho centímetros de ella, una pieza cuadrada de papel gris, de un centímetro de lado, cuya luminancia sea más o menos igual al gris de la nieve. Para producir el mismo efecto óptico, Gregory y yo recurrimos a un ordenador, que generaba las formas geométricas y el fondo de puntos escintilantes.

Si se clava la mirada muy atentamente en la etiqueta circular durante unos diez segundos, se descubrirá que el cuadrado desaparece, "reemplazado" por el fondo de puntos centelleantes. Sospechamos que este proceso de relleno es análogo al asociado con el punto ciego auténtico y que posiblemente se funda en mecanismos neurológicos similares. Es probable que la desaparición del cuadrado se deba a fatiga por sobrestimulación de las neuronas que señalan la presencia del cuadrado. Tal desvanecimiento no se produce en circunstancias normales, porque el ojo suele mirar y explorar alrededor del centro de atención, evitando así la sobrestimulación.

Los resultados anteriores son concordantes con experiencias fisiológicas recientemente llevadas a cabo por Charles Gilbert y Torsten Wiesel, de la Universidad Rockefeller. Estos investigadores, estudiando primates, han efectuado un notable descubrimiento: las células de la retina ubicadas en torno a una zona lesionada e insensible a la luz pueden empezar muy rápidamente a influir en la corteza visual primaria correspondiente a la región asociada con esa misma área. Esta observación, con otras efectuadas por Ricardo Gatas, del Instituto Nacional de la Salud, y por John Kaas, de la Universidad de Vanderbilt, pudiera explicar el proceso de relleno señalado por nosotros.

Hemos acertado hace poco con una interesante variación del primer experimento de "centelleo". Cuando el voluntario indicaba que el cuadrado había quedado relleno de puntos escintilantes, le dábamos instrucciones al ordenador para que cubriera la pantalla de gris uniforme.



Para nuestra sorpresa, los voluntarios informaron de persistencia de puntos centelleantes en la región donde el primitivo cuadrado gris había sido rellenado. Tal retazo podía llegar a perdurar hasta unos diez segundos.

La observación induce a pensar que un conjunto de neuronas se encarga de generar una representación de la región rellena con puntos centelleantes. Las pruebas implican, además, que la representación puede persistir incluso tras la desaparición de los puntos circundantes.

También es posible observar efectos de relleno en configuraciones estáticas, no centelleantes. En ese orden, los bordes de color tienden a difuminarse y desvanecerse cuando el sujeto fija su atención en una imagen determinada. (Tal fenómeno ha sido estudiado concienzudamente por A. L. Yarbus, de la Academia Rusa de Ciencias en Moscú, y por Thomas Piantanida, de SRI International). Mi hijo, Chandramani Ramachandran, y yo hemos experimentado con un motivo en el que un disco gris va a caballo sobre la divisoria vertical de dos colores, verde y azul, de igual luminancia. Pedimos a los sujetos que fijasen la mirada en el disco durante varios segundos. Informaron que el disco quedaba relleno de dos colores, pero no conseguían distinguir una frontera o divisoria entre los colores; sí percibían, en cambio, una zona desdibujada y nebulosa.

A continuación alteramos un tanto la imagen, añadiendo varios segmentos horizontales de color negro. Era nuestra intención la de crear un contorno ilusorio coincidente con la divisoria de colores. Después de que los sujetos escrutasen la figura durante unos segundos, los colores rellenaron el disco desde uno y otro lado. Pero, a diferencia del experimento anterior, esta vez quedó definida una nítida divisoria entre colores a lo largo del contorno ilusorio. Tal resultado causa sorpresa, porque casi todos los investigadores de la visión han dado por supuesto que el proceso de relleno depende de factores elementales, por ejemplo, la presencia de bordes o contornos definidos por cambios de luminancia.

A lo largo del año pasado hemos emprendido investigaciones sobre uno de los tipos de puntos ciegos más importantes. Cuando una persona se lesiona una región diminuta de la corteza visual, sea debido a un accidente, a enfermedad o a cirugía, es posible que sufra de escotoma: quedarse ciego en una pequeña porción del campo visual.

Suele ocurrir que las personas ignoren por completo que sufren escotoma. Al observar, por ejemplo, los motivos del empapelado no perciben su escotoma en cambios de color o discontinuidades en el motivo; de hecho, el motivo les ofrece un aspecto uniforme. Y si pegamos sobre el empapelado un disco de cualquier color o motivo en la zona correspondiente a su escotoma, el afectado seguirá sin detectar el disco, viendo tan sólo el empapelado.

Mis colegas y yo examinamos dos sujetos que tenían escotomas próximos al centro de su campo de visión. (Hanna Damasio y Leah Levi nos ayudaron, al demostrar que las áreas visuales del cerebro de estos pacientes se hallaban realmente lesionadas.) Empezamos mostrándoles a los pacientes un gran círculo que se superponía sólo parcialmente a su escotoma. Los pacientes informaron que al cabo de unos ocho segundos emergía la parte oscurecida del círculo, completando la figura. Dicho efecto contrasta tajantemente con experimentos similares efectuados en el punto ciego natural. Cuando una parte del círculo caía en el ámbito del punto ciego, no era rellenado.

¿A qué se debe esta diferencia? La mayoría de las células de la región ilesa de la corteza visual reciben señales procedentes de células retinianas de ambos ojos; pero la corteza contiene un retazo de neuronas correspondientes al punto ciego izquierdo, el cual solamente recibe señales emitidas por el ojo derecho. (Existe una disposición similar para el punto ciego del ojo derecho.) Así pues, si un círculo cae parcialmente en el punto ciego del ojo izquierdo, el ojo derecho puede compensar la deficiencia señalando la presencia de la porción de círculo invisible al ojo izquierdo. El sistema visual percibe un círculo completo. Pero si el ojo derecho está cerrado, no señala la presencia de la pieza oscurecida, y el sistema visual se limita a admitir que falta una porción de círculo.

Por otra parte, ante la destrucción de cierta zona de la corteza visual, ésta no podrá procesar la información enviada por ninguno de los dos ojos, y el sistema visual parece adaptarse y rellenar la porción ausente.

Generamos a continuación la imagen de una recta vertical interrumpida por un disco. Los pacientes infor-

maron que, al orientar el escotoma hacia el disco, la línea quedaba completada, aunque, curiosamente, el proceso requería unos cinco segundos. (Nunca se ha observado tanta demora en el caso del punto ciego natural.) Desplazamos horizontalmente la sección superior de la línea, con lo que las partes situadas a cada lado del disco dejaron de ser colineales. Los pacientes explicaron que, al principio, las líneas parecían hallarse desalineadas, si bien no tardaban en moverse horizontalmente una hacia la otra, hasta quedar colineales y enlazarse a través del escotoma; la sensación de movimiento era, decían, muy vívida.

Tan sólo nos es dado conjeturar la causa de que las líneas parezcan tornarse colineales. Es posible que una de las áreas visuales superiores reciba ciertas indicaciones de que los segmentos situados a cada lado del escotoma forman parte de la misma recta. Cuando esta región no recibe señales en conflicto procedentes de la corteza visual primaria (por estar lesionada), el sistema visual puede acabar por interpretar la imagen como una única línea vertical.

Finalmente, Kerrie A. Maddock, Daniel Plummer y el autor solicitaron a uno de los pacientes que mirase una pantalla de televisión que exhibía puntos rojos centelleantes. En un primer momento, el paciente declaró que sólo rellenaba su escotoma el color rojo; al cabo de unos ocho segundos, le pareció que también lo rellenaban los puntos rojos escintilantes. Este experimento induce a pensar que la región visual encargada del relleno de color podría diferir del área asociada con el relleno del movimiento. (La corteza visual de los monos muestra diferenciación de tales áreas.)

Confiamos en que podremos con el tiempo elucidar las semejanzas y las diferencias entre escotomas y puntos ciegos.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

VISION: A COMPUTATIONAL INVESTIGATION INTO THE HUMAN REPRESENTATION AND PROCESSING OF VISUAL INFORMATION. David Marr. W. H. Freeman and Company, 1982.

EYE AND BRAIN. R. L. Gregory. Princeton University Press, 1990.

PERCEPTUAL FILLING IN OF ARTIFICIALLY INDUCED SCOTOMAS IN HUMAN VISION. V. S. Ramachandran y R. L. Gregory en *Nature*, vol. 350, n.º 6320, págs. 699-702; 25 de abril de 1991.

FILLING IN GAPS IN PERCEPTION. V. S. Ramachandran en *Current Directions in Psychological Science* (en prensa).

Optica binaria

El maridaje de la óptica con la microelectrónica ha producido ya lentes útiles de un cuarentavo del grosor de esta página y conjuntos de 10.000 telescopios, cada uno de ellos con diámetro igual al de un cabello humano

Wilfrid B. Veldkamp y Thomas J. McHugh

La visita a un taller de óptica de precisión parece que nos retrotrae a otra época: por todas partes máquinas pesadas, correas, poleas, envases de estaño, brochas de pintura, pilas llenas de salpicaduras, estufas de cocción y boquillas de riego. Expertos artesanos manejan ruedas de tallado y luego herramientas de hierro colado recubiertas de abrasivos de granos progresivamente más finos para dar forma a las lentes destinadas a los telescopios, los instrumentos de tratamiento óptico de las señales y otros muchos sistemas. Aunque estos métodos permiten obtener lentes de gran calidad con una precisión en la forma del orden de una pequeña fracción de longitud de onda, el proceso de fabricación es lento y laborioso. Por otra parte, los sistemas de tallado y pulido sólo pueden producir lentes de forma esférica, que no son capaces de focalizar la luz con toda la eficacia deseable.

La óptica binaria (denominada así por su estrecha relación con la producción de circuitos digitales) es una nueva técnica que elimina casi todos los procesos tradicionales de fabricación de lentes. En su lugar, los diseñadores graban las formas deseadas directamente en la superficie de cualquier material óptico, utilizando técnicas que en principio se desarrollaron para la fabricación de circuitos integrados. Pueden así obtenerse lentes de alta calidad y reproducirse, con rapidez y economía, elementos ópticos cuyas propiedades de focalización se pueden ajustar según demanda por procedimientos que hasta ahora no eran posibles.

Gracias a esta tecnología, los ingenieros ya no se ven limitados por las posibilidades de la óptica convencional, sino que pueden crear virtualmente cualquier sistema o componente capaz de ser concebido por la imaginación humana, con tal de que dichos sistemas los pueda fabricar ya la técnica de microcircuitos. Por otra parte, a medida que se perfeccionen los métodos de fabricación de microcircuitos, también lo hará la óptica binaria. Entre las aplicaciones que actualmente se investigan pueden citarse las microlentes para la visión por ordenador, los multiplexores de luz utilizados en las comunicaciones ópticas e incluso la microcirugía mediante óptica binaria cuya finalidad es potenciar la capacidad de visión humana. Hay muchas empresas involucradas en la investigación sobre óptica binaria, y algunas han comenzado ya a desarrollar productos. El ámbito de esta nueva técnica es tan vasto, que a los diseñadores todavía les queda por explorar una gran parte de su potencial.

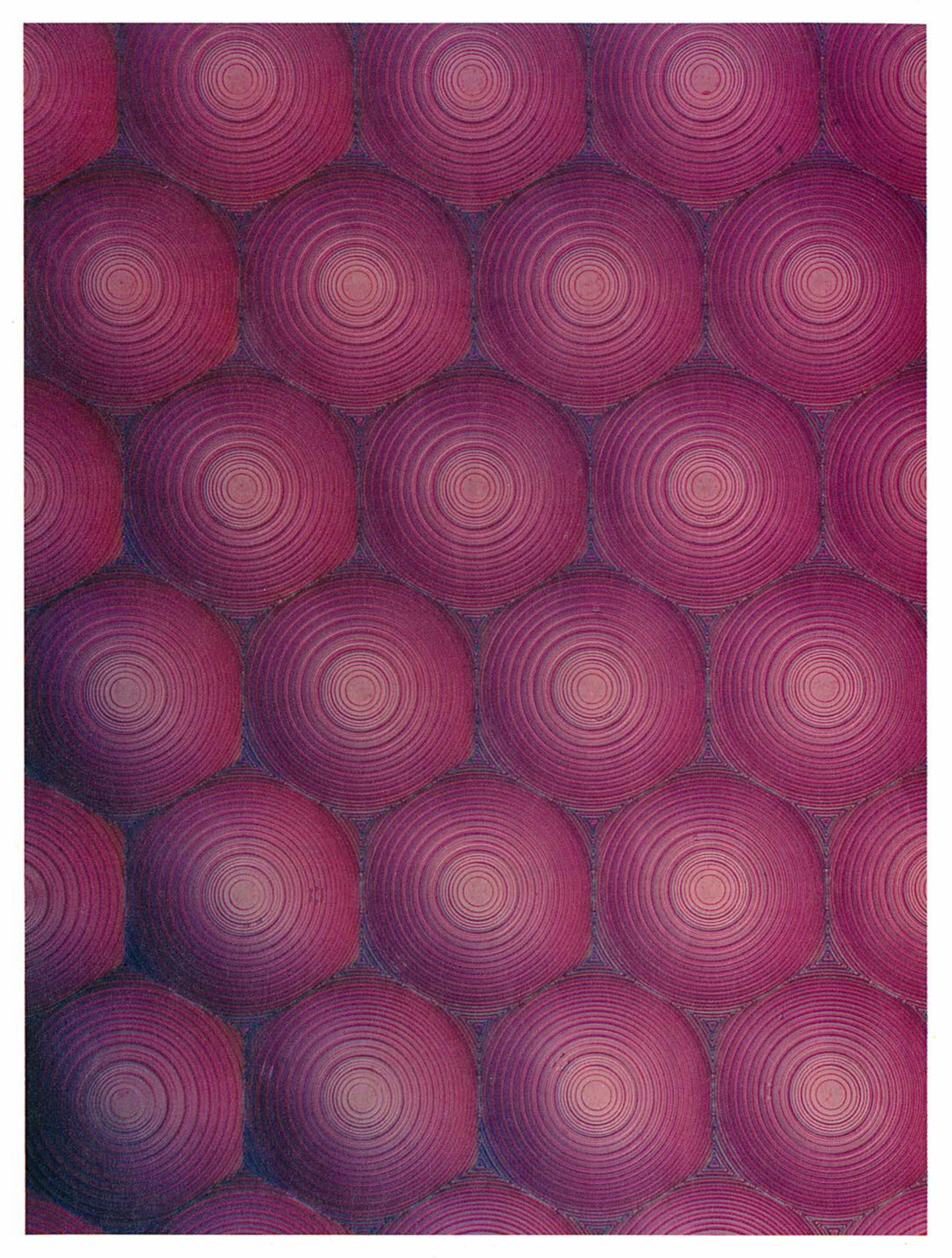
Además de fabricarse por métodos totalmente ajenos a los utilizados para la mayoría de las lentes, los dispositivos de óptica binaria funcionan de acuerdo con otros principios físicos: el control de la luz no se realiza por refracción, sino apoyándose en la difracción. Sabemos que la acción focalizadora de una lente convencional se basa en que los rayos de luz procedentes de una fuente distante que atraviesan la lente cerca de sus bordes, incidiendo en su superficie más oblicuamente, sufren una desviación mayor que los que pasan por el centro de la lente. La desviación de los rayos luminosos es un fenómeno que se presenta siempre que la luz pasa de una sustancia a otra con distinto índice de refracción. Por el contrario, un dispositivo basado en la óptica binaria rompe el frente de ondas de la luz incidente en cada punto de la superficie de la lente, y lo reconstruye en forma de una onda que viaja en la dirección adecuada hacia el punto focal.

La mayoría de los sistemas ópticos refractivos (categoría que incluye a casi todos los sistemas, excepto los utilizados en los telescopios astronómicos, que trabajan por reflexión) se ven afectados por una serie de problemas inherentes, tales como la aberración esférica. Consiste este fenómeno en que la luz que atraviesa partes diferentes de la lente se focaliza en distintos puntos, a lo largo del eje óptico, produciendo una imagen borrosa; para compensar la aberración, los expertos a menudo se ven obligados a especificar lentes de varios materiales y curvaturas diferentes.

Los elementos ópticos difractivos pueden ser mucho más delgados y ligeros que los refractivos, ya que sólo necesitan introducir unos cambios en la forma de los frentes de onda que equivalen a una pequeña fracción de la longitud de onda correspondiente. Estos elementos trabajan según el principio de Huygens: cada punto del frente de onda del haz de luz manipulado actúa como una fuente de ondas esféricas cuyas interferencias constructivas y destructivas producen un nuevo frente de ondas, la forma del cual puede alterarse de manera que la trayectoria de la luz se desvíe, converja hacia un foco o muestre cualquier otro comportamiento que el diseñador elija.

Quizás el ejemplo más simple de este fenómeno sea la placa de zonas de Fresnel, que utiliza la difracción para focalizar luz monocromática. La placa de zonas consiste en una serie de anillos concéntricos que bloquean

WILFRID B. VELDKAMP y THOMAS J. McHUGH han dirigido los equipos de investigación de óptica binaria en el laboratorio Lincoln del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT) y en la empresa Hughes Danbury Optical Systems. Veldkamp, que acuñó el término "óptica binaria", cursó su licenciatura en los Países Bajos y se doctoró en el MIT. McHugh estudió en la Universidad de Rochester y sirvió en la Armada de los Estados Unidos como oficial de un submarino nuclear. En la actualidad dirige programas de ingeniería en la Hughes.



1. ESTA RED DE LENTES MICROSCOPICAS se fabricó con la técnica utilizada en la grabación de circuitos integrados sobre obleas de silicio. El tamaño de cada lente es tan sólo de 200 micrometros. Estas redes podrían revolucionar la visión artificial focalizando la luz sobre fotodetectores minúsculos rodeados por circuitos de procesamiento de imágenes.

la luz, separados por rendijas. El espaciado entre rendijas permite que las ondas luminosas procedentes de todas ellas se interfieran destructivamente, salvo en el punto focal de la placa, donde se refuerzan mutuamente para producir un punto brillante. Los procedimientos litográficos y de grabación que se utilizan en la fabricación de circuitos integrados resultan perfectamente adecuados para producir una estructura del tipo de estas placas de zonas: las regiones que han de transformarse en rendijas sufren el ataque de la grabación, mientras que el resto del material se deja inalterado.

Aunque fáciles de fabricar, las placas de zonas de Fresnel son ópticamente ineficientes, puesto que menos de la mitad de la luz que sobre ellas incide atraviesa las rendijas. La óptica binaria produce efectos similares con mejor rendimiento mediante la grabación, a distinta profundidad, de partes diferentes de un blanco óptico, en vez de limitarse a bloquear o dejar pasar la luz a través del mismo.

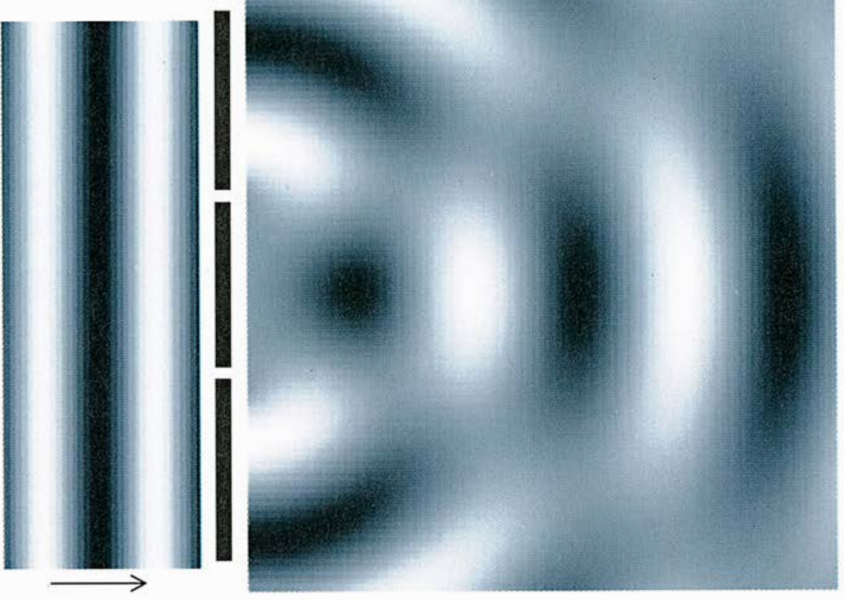
La estructura óptica binaria más sencilla es la del prisma ordinario. Visto al microscopio, presenta el aspecto de una serie de diminutas escaleras. En esencia, cuando una onda luminosa incide sobre la superficie del prisma se divide en frentes de ondas secundarios, cada uno de los cuales es afectado de un retardo proporcional al espesor de la escalera en ese punto (el espesor máximo

La óptica binaria descansa en el fenómeno de la difracción

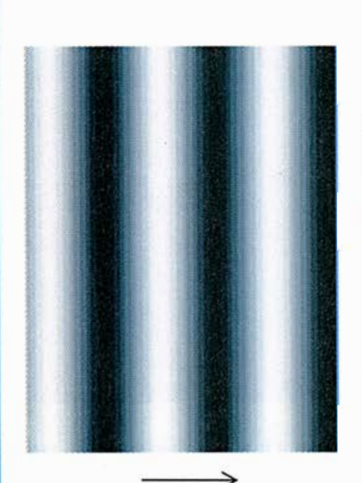
Los efectos de interferencia permiten que la óptica binaria desvíe y focalice los rayos luminosos, logrando así los mismos resultados que la óptica refractiva convencional. El ejemplo más simple de difracción lo tenemos en el experimento con dos rendijas (*derecha*): las crestas y valles de las ondas luminosas que atraviesan dos pequeñas ranuras se combinan entre sí, creando una imagen de franjas claras y oscuras.

Según el principio de Huygens, cada punto de un frente de ondas ópticas se comporta como una pequeña rendija generadora de una nueva onda esférica, cuya interferencia con las ondas vecinas crea el siguiente conjunto de crestas y valles. Cuando uno de esos frentes de ondas atraviesa un dispositivo óptico binario (*abajo*), cada una de sus partes experimenta un retardo proporcional al espesor de la configuración en escalera del dispositivo. La interferencia entre las diferentes partes del frente de ondas produce una nueva onda que avanza en dirección diferente a la de la onda original.

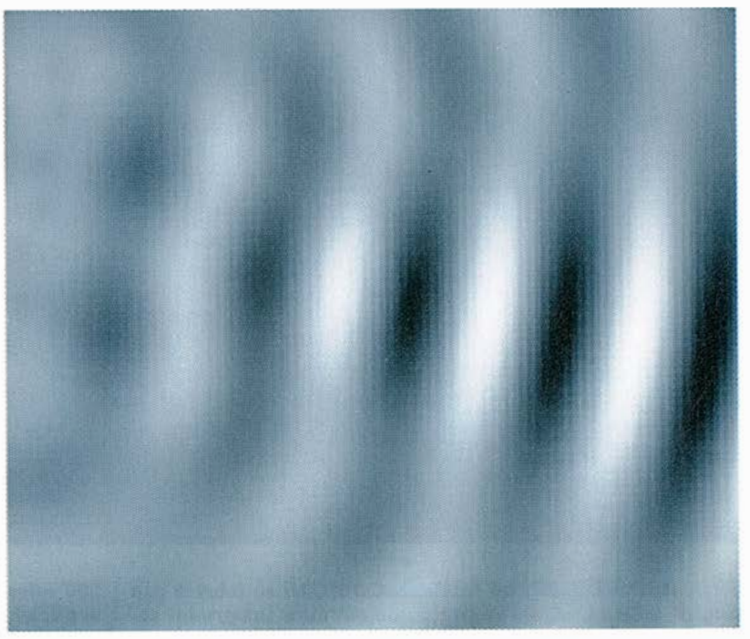
DIFRACCION POR DOS RENDIJAS



DIFRACCION POR ESCALERA







será aquel que produzca un retardo igual a una longitud de onda). Cuando todos estos frentes se interfieren, originan un nuevo frente de ondas que forma cierto ángulo respecto al frente de ondas incidente, en virtud de lo cual la luz sufre una desviación. Debe señalarse, además, que en lugar de los milímetros de vidrio que se necesitan para desviar la luz con un prisma ordinario, la versión de óptica binaria requiere tan sólo dos micrometros de material.

Una lente es, en esencia, un prisma variable, capaz de desviar la luz según diferentes ángulos, dependiendo de la parte de la superficie sobre la que incida. Por tanto, la técnica de la escalera puede hacerse extensiva a la construcción de un dispositivo de focalización basado en la óptica binaria, para lo cual se procede a grabar un blanco de forma circular según una serie de patrones de escaleras concéntricas. A medida que nos vamos alejando del centro, cada una de las sucesivas escaleras se va haciendo más empinada y más próxima a sus vecinas, y cuanto mayor es la inclinación de las escaleras, mayores son los ángulos de desviación de la luz. Por esta razón, la luz que atraviesa los bordes de la lente se dirige al mismo punto focal que la luz que atraviesa el centro de esa misma lente. Los ingenieros pueden eliminar la aberración esférica escogiendo adecuadamente la pendiente y la separación de las escaleras.

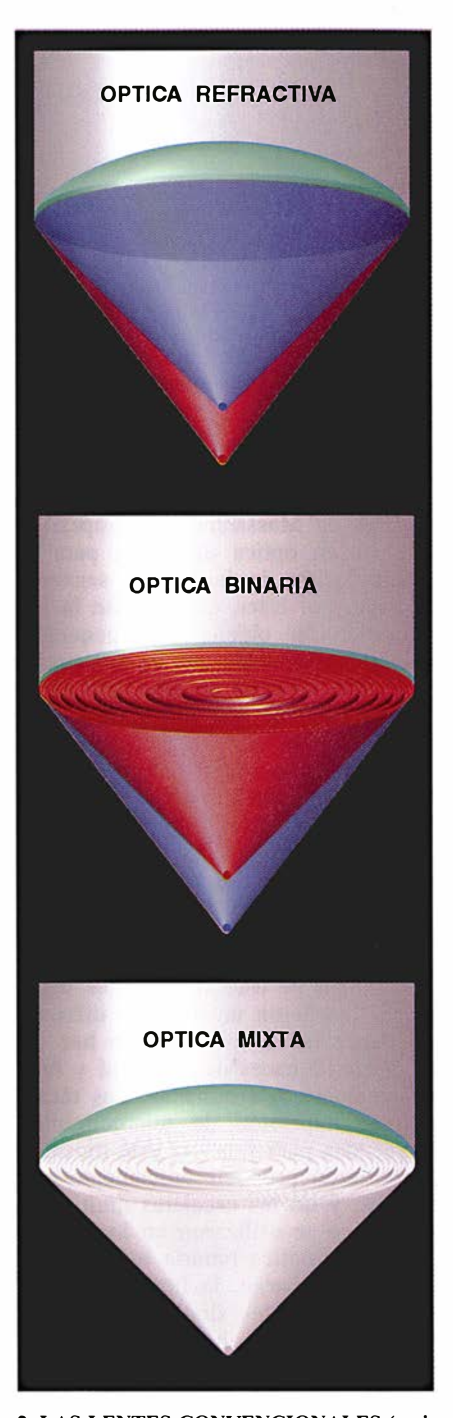
Por supuesto, es posible realizar otras muchas clases de microestructuras escalonadas. Las lentes cuyas escaleras tienen un espesor de dos longitudes de onda o más pueden focalizar la luz en un margen de longitudes de onda mucho más extenso; lentes que, además, dispersan menos luz que las versiones de espesor igual a una longitud de onda. Los espesores correspondientes a fracciones de longitud de onda proporcionan componentes binarios que actúan como divisores o recombinadores de haces luminosos.

Las técnicas empleadas en la fabricación de los circuitos integrados más avanzados reproducen trazados diminutos, de sólo medio micrometro; y pueden controlarse hasta valores de un solo nanómetro las depresiones existentes en dichos trazados. En consecuencia, es posible fabricar dispositivos de óptica binaria utilizando las técnicas de los semiconductores con un coste inicial muy pequeño.

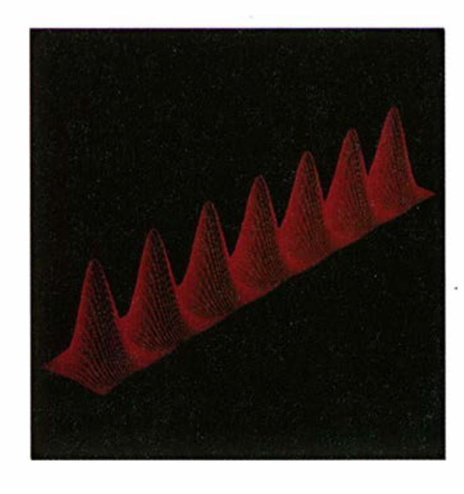
Por otra parte, la fabricación litográfica de estructuras de escaleras con niveles múltiples es barata. En cada etapa se duplica el número de niveles de la escalera: con una sola fase de exposición y grabado con máscara se obtienen dos niveles; repitiendo el proceso con otra máscara cuya anchura característica sea la mitad que la anterior y grabando a la mitad de profundidad, resulta una estructura de escalera en cuatro niveles; con un tercer ciclo se consigue una escalera de ocho niveles, y así sucesivamente. Los dispositivos de óptica binaria típicos no requieren más de cuatro de estos ciclos de grabación, y en consecuencia son más fáciles de fabricar que los circuitos electrónicos integrados, que a veces exigen hasta una docena de ciclos de grabación diferentes, alternados con la implantación de iones y la deposición de polisilicio, metales y aislantes.

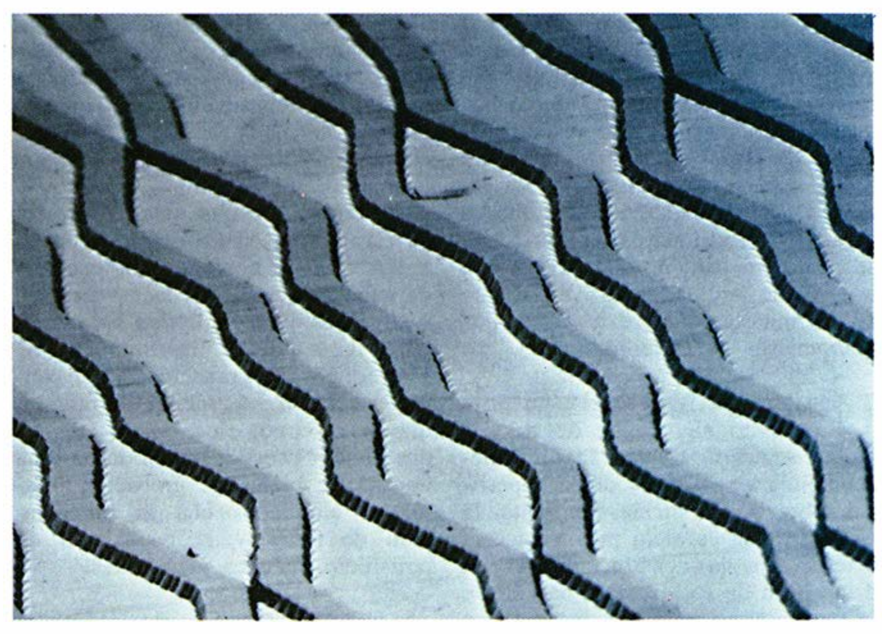
Aunque la sencillez de los procesos de máscara y grabado permita fabricar complejos elementos de óptica binaria en masa y a un coste muy económico, la técnica utilizada entraña ciertos inconvenientes. Las superficies obtenidas no son las curvadas y angulosas que caracterizan a la óptica convencional, sino una serie de escalones planos que se aproximan más o menos a la forma deseada. Estas desviaciones de la forma ideal hacen que la luz se disperse fuera de la trayectoria prevista. Unas pérdidas de hasta un 5 % en la superficie de cada elemento de óptica binaria pueden degradar seriamente el funcionamiento de los sistemas ópticos que contengan seis o más de estos elementos. El rendimiento óptico de tales dispositivos (medido por la cantidad de luz que se reencamina en una dirección predeterminada) se eleva a medida que se alcanzan aproximaciones más estrechas a la forma ideal. Con dos niveles se consiguen rendimientos máximos del 41 %; con cuatro niveles, el rendimiento es del 81 %; con ocho niveles, del 95 %, y con dieciséis, del 99 %.

Aunque ha sido el desarrollo de las técnicas de fabricación de circuitos integrados en los años setenta y ochenta lo que ha hecho factible la óptica binaria, los elementos ópticos difractivos no son nuevos. Desde hace decenios se dominan los principios de diseño para diferentes tipos de óptica difractiva. Citemos las redes de difracción variables, las llamadas quinoformas —lentes de formas escalonadas cuyas superficies se recortan en una cuantía exactamente igual a una longitud de onda cada vez que su grosor aumenta en dicha cantidad— y los hologramas. (Si bien los hologramas más conocidos son los que manipulan frentes de ondas planos para producir imágenes, también pueden obtenerse simplemente para desviar de un modo eficaz la luz según ángulos diferentes sin formar una imagen.) Pero, difíciles de fabricar, apenas si se han utilizado esos componentes difractivos.



2. LAS LENTES CONVENCIONALES (*arriba*) focalizan más la luz azul que la luz roja; este fenómeno se denomina aberración cromática. Los elementos ópticos binarios (*centro*), por el contrario, focalizan más la luz roja que la azul. La combinación de óptica convencional y binaria en un único elemento (*abajo*), compensa la aberración cromática para un moderado margen de longitudes de onda.





3. MULTIPLEXOR DE OPTICA BINARIA (*derecha*): divide un haz de luz de láser en siete haces de la misma amplitud (*arriba*), separado cada uno de ellos por un ángulo preciso. Realizar esto por óptica convencional sería inviable.

A finales de los años setenta, un grupo de investigadores del laboratorio Lincoln del MIT (Instituto de Tecnología de Massachusetts) empezó a trabajar en óptica difractiva para la manipulación de la luz en sensores de radar por láser, que utilizan la luz para detectar objetos más pequeños que los observables con un radar convencional. El radar de láser está constituido por una red lineal de detectores, pero la acción de guiado del haz de retorno hasta estos detectores utilizando elementos ópticos convencionales, como los espejos semirreflectantes, no resultó en absoluto práctica, ya que el manejo del tren de ondas ópticas requería muchos ajustes trabajosos y poco fiables, y se perdía gran parte de la luz.

En lugar de este sistema, los ingenieros diseñaron un mosaico difractivo capaz de dividir un solo haz de láser en 12 haces de amplitud y fase exactamente determinadas. Las técnicas de impresión de microcircuitos empleadas para fabricar este mosaico permitieron producir únicamente dos niveles, y no las escaleras multinivel que luego se utilizaron en los dispositivos de óptica binaria más modernos. Sin embargo, la luz que incidía sobre los resaltes sinuosos de la superficie del mosaico era difractada de tal manera que su figura de interferencia producía 12 nuevos haces, cada uno de los cuales abandonaba dicha superficie según un ángulo de emisión diferente. Procediendo a emparejar con precisión estos haces con la red de detectores del receptor, se consiguió mejorar notablemente la eficiencia y resolución de la detección del radar de láser.

La Agencia de Proyectos de Investigación Avanzada para la Defensa subvencionó la realización de un nuevo trabajo del laboratorio Lincoln dentro del programa del Departamento de Defensa de los Estados Unidos para el desarrollo de sensores de infrarrojos de bajo coste. Esta investigación condujo finalmente a la fabricación de microestructuras ópticas multinivel.

Por aquel tiempo aproximadamente, los ingenieros de la empresa que hoy es la Hughes Danbury Optical Systems trabajaban en la aplicación de los elementos holográficos difractivos a la fabricación de espejos de telescopios de dimensiones muy grandes, elementos que eran necesarios para desviar una pequeña cantidad de luz de láser hacia un sensor que supervisaba el funcionamiento óptico del sistema.

El tamaño de los espejos impedía colocarlos sobre un banco de óptica en el que pudiera revestirse su superficie con emulsiones y exponerse los correspondientes hologramas por métodos convencionales. En vez de ello, los ingenieros decidieron calcular matemáticamente los diagramas de fase de los hologramas deseados y, a continuación, producirlos y grabarlos sobre las superficies de los espejos mediante técnicas microlitográficas tomadas de la industria de los semiconductores. El éxito del proyecto abrió el camino hacia ambiciosas aplicaciones. La óptica binaria no sólo es capaz de producir diagramas holográficos, sino que también puede generar casi cualquier transformación de un frente de ondas ópticas.

Los investigadores de la firma Hughes comprobaron primeramente sus nuevas capacidades creando un componente óptico binario susceptible de utilizarse en un sistema de reconocimiento de configuraciones. Este dispositivo había de aumentar la sensibilidad del sistema general respecto a los detalles de la forma de un objeto, y en cambio disminuirla en cuanto a su tamaño u orientación rotacional.

Las propiedades ópticas del dispositivo diseñado transforman los círculos concéntricos en líneas rectas paralelas. En consecuencia, cualquier objeto que esté centrado en el campo de visión del sistema es dividido en delgados anillos concéntricos, y cada uno de estos anillos es transformado en una banda rectangular. Cuando se hace girar al objeto alrededor del centro del campo, las características distintivas de la imagen se deslizan desde una parte de la banda rectangular a la otra. La mayoría de los sistemas de reconocimiento de configuración identifican los rasgos que han sufrido una traslación con mucha mayor facilidad que los rasgos que han sufrido una rotación.

La idea en que se fundan estos dispositivos no es nueva, pero ningún óptico sería capaz de fabricar el componente requerido utilizando las técnicas de tallado y pulido convencionales. Todos los intentos de obtener dispositivos similares mediante hologramas producidos por ordenador han resultado muy laboriosos y ópticamente ineficaces. La versión basada en la óptica binaria ha aventajado en prestaciones a todas las demás. Desde entonces, se han diseñado lentes para corregir el astigmatismo, la aberración esférica y otros varios defectos ópticos.

Uno de los pocos obstáculos inevitables que presenta el empleo de

elementos ópticos difractivos es su elevado poder de dispersión: estos elementos tienden a descomponer la luz en sus colores constitutivos. Pero los diseñadores de lentes han descubierto cómo hacer, en algunos casos, de este inconveniente virtud, y así sucede que la combinación de elementos ópticos binarios con lentes convencionales permite reducir la aberración cromática debida a las propiedades dispersivas del vidrio y de otros materiales refringentes.

En el diseño y fabricación tradicional de lentes, las aberraciones cromáticas se reducen al mínimo uniendo lentes de materiales con propiedades dispersivas diferentes, técnica que eleva sensiblemente el coste y la complejidad del producto resultante. Por fortuna, la dispersión de los sistemas ópticos binarios es de signo opuesto al de la mayoría de los vidrios ordinarios; en consecuencia, para una banda limitada de longitudes de onda, la aberración cromática de una lente binaria compensará a la de una lente convencional sobre la cual aquella lente haya sido grabada. Aunque conocidos desde tiempo atrás los principios de la corrección difractiva, su aplicación no daba resultados prácticos. Los hologramas difractivos generados por ordenador se consideraban demasiado ineficaces, los hologramas ópticos harto difíciles de producir y los medios de película o gelatina holográfica, en exceso inestables para un trabajo de alta precisión.

La óptica binaria resuelve todas estas limitaciones mediante la grabación de elementos difractivos de alto rendimiento directamente sobre el material óptico seleccionado. En efecto, un diseñador puede sintetizar nuevos tipos de vidrio cuya capacidad para desviar la luz varíe con la longitud de onda en la forma deseada. Esta gran flexibilidad añadida puede hacer innecesaria la utilización de materiales ópticos costosos o problemáticos, reducir el número de elementos ópticos de un sistema y mejorar su comportamiento global.

Los investigadores del laboratorio Lincoln diseñaron una lente de óptica binaria y la grabaron sobre la cara plana de una lente planoconvexa (lente que posee una cara plana y otra cara curva). Esta lente híbrida, fabricada con sílice fundida capaz de transmitir luz ultravioleta, estaba exenta de aberraciones cromáticas y esféricas para longitudes de onda comprendidas entre 2460 y 2500 angstroms. Las aberraciones cromáticas en esa región del espectro son particularmente abultadas: la anchura de banda limitada por difracción de una lente sin corrección es menos de una milésima de la que presenta la lente híbrida de óptica binaria y convencional.

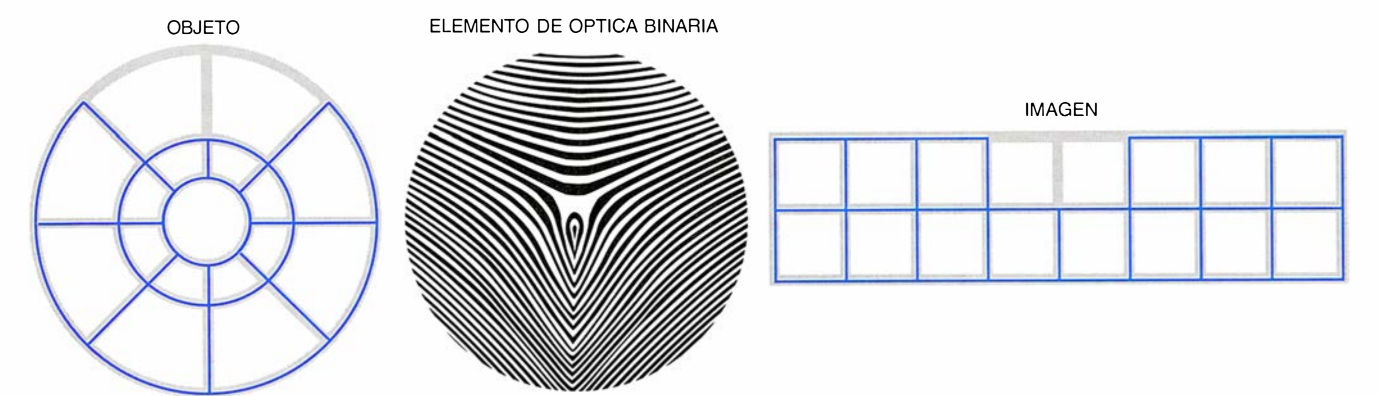
Dado que las pastillas ("chips") de semiconductores y de óptica binaria se fabrican con el mismo equipo, es posible la grabación directa de componentes ópticos sobre los circuitos integrados. Los diseñadores pueden colocar sobre una de estas pastillas toda una red de microlentes o incluso unidades de procesamiento optoelectrónico totalmente integradas, posibilidad que encierra el germen de una nueva era de sistemas sensores inteligentes y ultracompactos.

Se ha dado ya un primer paso en esta dirección fabricando lentes de óptica binaria cuyos diámetros se acercan al de un cabello humano (de 50 a 100 micrometros). Estos dispositivos microópticos binarios se pueden fabricar uno a uno o en redes de decenas de miles de elementos por centímetro cuadrado.

Estas lentes no se limitarán a focalizar la luz sobre redes de minúsculos fotodetectores electrónicos, sino que desempeñarán también un importante papel en configurar la arquitectura de los futuros sistemas de procesamiento de imágenes. Las actuales arquitecturas de visión artificial están basadas en redes de detectores que proporcionan imágenes parecidas a las de una cámara fotográfica, a partir de las cuales, y a través de cálculos muy laboriosos, se pueden deducir todos los rasgos importantes como los perfiles, las superficies y en último término las descripciones de los objetos presentes en una escena. Las lentes microscópicas que focalizan la luz incidente sobre un detector darán paso a elementos de procesamiento directamente conectados a cada uno de los detectores. Los investigadores pueden construir redes de detectores capaces de reproducir miméticamente la estructura de la visión biológica, que hasta ahora ha demostrado ser superior a las versiones de visión artificial.

Este avance permitirá fabricar sensores de imágenes que se ajusten a los variables niveles luminosos, que detecten el movimiento y que determinen automáticamente la posición de los perfiles de los objetos de un cuadro escénico. Uno de los autores (Veldkamp) ha acuñado el término "amacrónicos" para designar estos circuitos especiales, basándose en el hecho de que emulan la detección de movimiento, la intensificación de los bordes y la función de reducción del intervalo dinámico que poseen las células amacrinas de la retina.

El modelo biológico se puede emular en sistemas aún más elaborados. Así, unos elementos ópticos binarios añadidos podrían interconectar las células de redes de fotodetectores apilados en capas, tal como sucede en las células de la retina. Además, un conjunto integrado de diodos fotoemisores y sistemas microópticos podría transferir una imagen de bajo nivel a otra pastilla de silicio cuyos



4. LA TRANSFORMACION OPTICA convierte círculos concéntricos (*izquierda*) en líneas rectas (*derecha*). Esta transformación "logpolar-cartesiana" mejora los sistemas actuales de reconocimiento de configuraciones haciéndolos menos sensibles a la rotación de sus blancos. En el centro se muestra un mapa de contornos de fase del elemento óptico que forma la imagen.

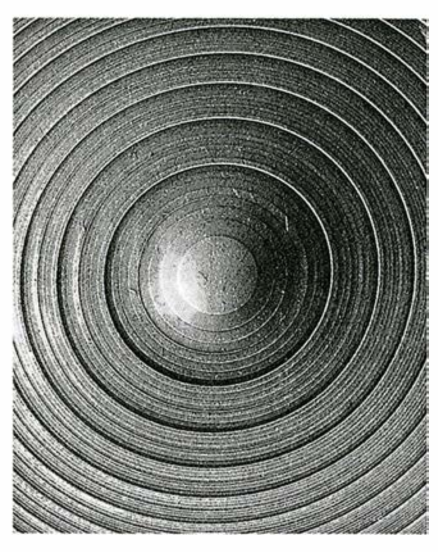
sensores serían sensibles, por ejemplo, a la orientación o contextura de los detalles de la imagen. Por último, una pila de circuitos procesadores de imágenes proporcionaría una descripción, básicamente simbólica, de la escena, casi del mismo modo que el córtex visual transmite su información al resto del cerebro.

Además de contribuir a mejorar la visión artificial, los dispositivos amacrónicos servirán para reducir los requisitos de anchura de banda propios de la transmisión de imágenes. En vez de enviar una imagen completa, estos sistemas se hallarán capacitados para extraer y transmitir la información esencial a partir de la cual pueda reconstruirse una imagen al otro extremo del sistema. Algunas compañías japonesas han empezado ya a desarrollar sistemas amacrónicos para aplicaciones de videotelefonía.

La revolución de la microelectrónica debe una gran parte de su éxito a la óptica de alta calidad. Sin la existencia de sistemas ópticos muy refinados, capaces de proyectar las imágenes reducidas de las máscaras del circuito sobre las obleas de silicio, hubiera sido imposible la producción industrial de microprocesadores de bajo coste. En la actualidad, gracias al desarrollo de la óptica binaria, la microelectrónica parece estar pagando su deuda de una manera que muy pocos hubieran podido prever. Los ordenadores y los equipos modernos de procesamiento de semiconductores se utilizan ya para la fabricación de elementos ópticos que hasta ahora se consideraban irrealizables.

Del mismo modo en que los diseñadores de circuitos de hoy se sientan ante un terminal de ordenador y manipulan dispositivos de bloques funcionales electrónicos, tal vez algún día puedan sintetizarse los sistemas optoelectrónicos con ayuda del "ratón" de un ordenador o el accionamiento de un simple interruptor. Mediante la creación de diseños que combinen la óptica binaria y la convencional, los ingenieros podrán reducir a la mitad el número de elementos constitutivos de un sistema complejo.

Convertir ese futuro en realidad exigirá el desarrollo de mejores técnicas de diseño de óptica binaria, quizá recuperando métodos abandonados hace años por creer que el uso generalizado de la óptica difractiva de alta calidad no resultaría práctico. Nosotros hemos comprobado que los viejos libros y los artículos técnicos olvidados pueden ser una fuente de inspiración muy rica para nuevos diseños viables. Como es natural, la óptica convencional y los métodos de fabricación experimentados a lo largo del tiempo no están en trance de desaparecer, ni deberían hacerlo. La óptica de la reflexión y la refracción seguirá utilizándose en diversas aplicaciones.



5. UNA LENTE BINARIA implantada en la superficie de la córnea corregiría la miopía, la hipermetropía y el astigmatismo. La lente que muestra la figura ha sido grabada mediante unos impulsos de luz láser ultravioleta sobre la córnea extraída de un cadáver.

La gama de posibilidades de manipulación de la luz que ofrece la óptica binaria es tan extensa que los diseñadores se enfrentan al reto de tener que aprender a un mismo tiempo dónde ha de utilizarse y dónde no ha de utilizarse la nueva técnica. A medida que las nuevas lentes se abren camino en aplicaciones que van desde la óptica de formación de imágenes convencional hasta las interconexiones con circuitos integrados y la visión artificial, los diseñadores se ven abocados a una situación nueva, en la que los límites no los imponen los materiales o las técnicas de fabricación, sino únicamente su propia visión creadora.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

HIGH EFFICIENCY MULTIPLE BEAM GRATINGS. Wai-Hon Lee en *Applied Optics*, volumen 18, n.º 13, págs. 2152-2158; 1 de julio de 1979.

COMPUTER SYNTHESIS OF DIFFRACTION OPTICAL ELEMENTS. Voldemar P. Koronkevich en *Optical Processing and Computing*. Academic Press, 1989.

BINARY OPTICS. Wilfrid Veldkamp en *McGraw-Hill Yearbook of Science & Technology: 1990*. McGraw-Hill, 1989.

LA RETINA DE SILICIO. Misha A. Mahowald y Carverd Mead en *Investigación y Ciencia*, n.º 178, págs. 42-49; julio de 1991.

Simpatría y coevolución entre el críalo y sus hospedadores

La evolución del parasitismo de cría actúa como si se tratara de una carrera de armamentos. Frente a las adaptaciones de los parásitos, los hospedadores desarrollan contra-adaptaciones, y ambos van refinando sus estrategias

Manuel Soler

Dejar descendencia es el imperativo más importante que rige la vida y el comportamiento de los organismos. A lo largo de la evolución ha ido apareciendo un abanico muy amplio de estrategias reproductoras, que tienden, todas, a obtener la mayor cantidad y calidad posibles: numerosos descendientes que sean capaces, al propio tiempo, de una progenie numerosa también. Destaca entre esas estrategias la del parasitismo de cría, que consiste en depositar los huevos en los nidos de otras especies para que los incuben y los críen, una vez eclosionados.

Pero es un fenómeno poco extendido. Se citan algunos ejemplos en los insectos, sobre todo en las hormigas. Así en la especie *Teleutomyrmex schneideri* dos o tres hembras pasan toda su vida sobre la hembra hospedadora, alimentadas y cuidadas por las obreras que no las distinguen de su propia reina. Los huevos de las hembras parásitas son recogidos junto con los de la reina propietaria del hormiguero y reciben idéntica atención.

El parasitismo de cría se manifiesta sobre todo en las aves, con casi un centenar de especies conocidas, la mitad de las cuales pertenecen a la familia de los cucúlidos, en la que se encuadran las dos especies parásitas que existen en Europa: el cuco (*Cuculus canorus*) y el críalo (*Clamator glandarius*).

La estrategia de parasitación difiere de una especie a otra. El cuco utiliza de hospedadores especies de pequeño tamaño. La hembra se acerca al nido y realiza la puesta del huevo procurando no ser descubierta, aunque, llegado el caso, puede ahuyentar a la hembra hospedadora que esté incubando. El críalo, por contra, se sirve de hospedadores mayores que él; la hembra no puede, pues, permitirse el lujo de dejarse sorprender por los propietarios del nido durante la puesta. De ahí que esta especie haya desarrollado un complicado mecanismo que exige el trabajo de la pareja en equipo. Se acercan ambos al nido de las urracas (*Pica pica*), primero la hembra que, en vuelos cortos, se aproxima y se posa en un árbol o arbusto de las inmediaciones. Llega a continuación, de una forma muy llamativa, el macho, emitiendo su reclamo hasta provocar a la hembra hospedadora en incubación, que abandona su nido para perseguirlo y expulsarlo del territorio. Son los segundos que aprovecha la hembra parásita para volar hasta el nido y realizar la puesta de su huevo.

MANUEL SOLER enseña etología en el departamento de biología animal y ecología de la Universidad de Granada, donde se recibió de doctor en 1984. Desde hace años viene dedicándose al estudio de los fenómenos de simpatría y alopatría en la coevolución de aves parásitas y hospedadoras.

Lo mismo el cuco que el críalo destruyen uno o varios huevos del hospedador al poner el suyo; si bien, el cuco se lo lleva en el pico para comérselo y el críalo se limita a romperlo, generalmente de forma indirecta. La cáscara del huevo parásito es de mayor grosor y dureza, por lo que destruye en su caída alguno o algunos de los del hospedador. Esta estrategia presenta la ventaja, en ambas especies, de restringir el número de pollos que van a nacer y, por consiguiente, la futura competencia del pollo parásito.

El color constituye otro criterio importante de diferenciación. La hembra de cuco pone huevos de una coloración mimética de la especie a parasitar; por tanto, divergerán de una hembra de cuco a otra según la especie hospedadora. En el críalo, los huevos de todas las hembras son muy similares entre sí, y la coloración no varía con la especie parasitada.

Pero la principal diferencia en la estrategia de parasitación de ambos cucúlidos reside en el comportamiento de sus pollos. Un joven cuco, a los pocos momentos de eclosionar, dedica todas sus energías a expulsar del nido los huevos o pollos existentes allí, hasta quedarse solo y recibir toda la comida aportada por los padres adoptivos. Los pollos de críalo no expulsan a sus compañeros de nidada, sino que mantienen una competencia con ellos por conseguir la mayor cantidad posible de las cebas aportadas por los adultos.

¿Qué adaptaciones presentan los pollos parásitos para vencer a sus hermanastros en la competencia por el alimento? La primera, y principal quizá, reside en el propio huevo. Los huevos de críalo, y los de las aves parásitas en general, necesitan un período de incubación más corto de lo que sería de esperar a tenor de su tamaño. El tiempo que dura la incubación es inversamente proporcional, por un lado, a la conductibilidad de vapor de agua del huevo (dependiente, a su vez, del área de los poros y de la estructura de la cáscara) y, por otro, a la proporción de pérdida de agua. Apoyándose en una muestra de 475 especies de aves, Rahn llegó a la conclusión de que el período de incubación es proporcional al peso del huevo elevado a 0,22.

El nacer antes supone ir con ventaja respecto a sus compañeros de nidada, por ejemplo, en lo relativo a la talla; añádase a ello que los pollos parásitos disponen de una cavidad bucal de color anaranjado, con unas papilas muy llamativas para los padres adoptivos. Se ha comprobado



CUCO *CUCULUS CANORUS*	**CRIALO** *CLAMATOR GLANDARIUS*
PARASITA A ESPECIES DE MENOR TAMAÑO	PARASITA A ESPECIES DE MAYOR TAMAÑO
LA HEMBRA PUEDE REALIZAR LA PUESTA DEL HUEVO SIN AYUDA DEL MACHO	LA HEMBRA REALIZA LA PUESTA DEL HUEVO CON LA COLABORACION DEL MACHO
LA HEMBRA PUEDE RETIRAR DEL NIDO Y COMER ALGUN HUEVO DEL HOSPEDADOR	LA HEMBRA DESTRUYE FRECUENTEMENTE HUEVOS DEL HOSPEDADOR, PERO NUNCA LOS COME NI LOS RETIRA
EL POLLO PARASITO EXPULSA A SUS HERMANASTROS Y QUEDA SOLO EN EL NIDO	EL POLLO PARASITO NO EXPULSA A SUS HERMANASTROS Y COMPITE CON ELLOS POR EL ALIMENTO

1. CUCO Y CRIALO, las dos únicas especies de aves parásitas existentes en Europa. Ambas pertenecen a la familia de los Cucúlidos y presentan estrategias reproductoras bastante diferentes, como se desprende de su comparación.

que las aves nidícolas con eclosión asincrónica, las urracas entre ellas, tienden a cebar las bocas situadas a mayor altura, de mayor tamaño y de coloración más destacada.

Desde una perspectiva evolutiva se ha interpretado el parasitismo de cría como una carrera de armamentos en la que los hospedadores van mejorando sus mecanismos de defensa, a cuyos cambios responden los otros refinando los mecanismos de parasitación. Este mecanismo implica la existencia de coevolución entre hospedador y parásito. Una definición rigurosa de coevolución implica que una característica de una especie ha evolucionado en respuesta a una característica de otra especie, la cual a su vez ha evolucionado en respuesta a la primera especie. No es fácil demostrar ese tipo de relación evolutiva íntima y recíproca, habida cuenta de que la mayoría de las especies interactúan con muchas otras especies. Por tanto, los ejemplos más claros de coevolución serán aquellos sistemas en cuyo seno interaccionan pocas especies. Así sucede en el caso de las relaciones entre aves parásitas y sus hospedadores. Concretamente, los ejemplos de parásitos especialistas, tal el del críalo, que utiliza a muy pocas especies como hospedadoras, se consideran hoy sistemas modelos para el estudio de la coevolución. Esta coevolución se puso de manifiesto al sacar a la luz el principal mecanismo de defensa con que cuentan los hospedadores: reconocer los huevos del parásito y expulsarlos del nido.

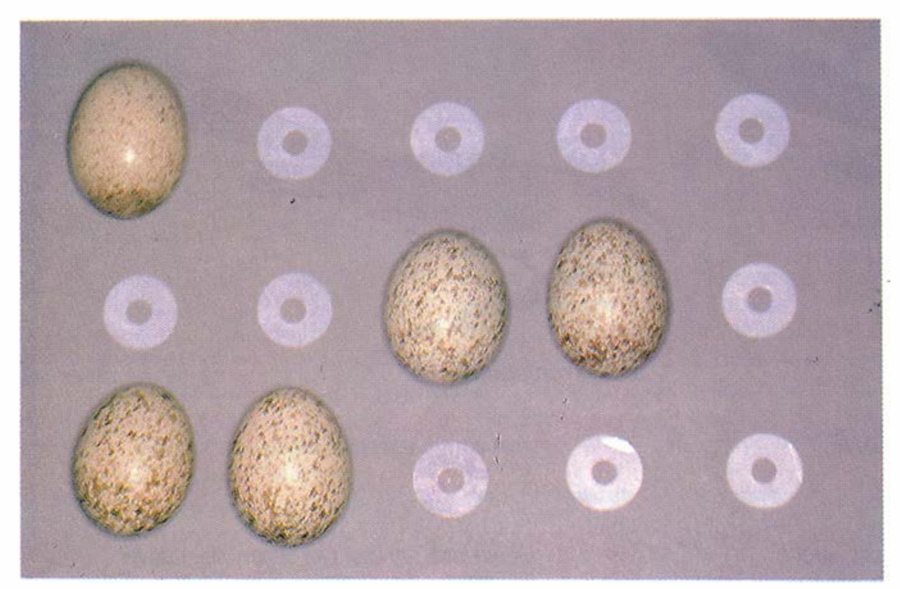
La expulsión de huevos extraños del nido implica un reconocimiento que puede ser innato o aprendido, según las especies y, también, según los individuos de una misma especie. Los hospedadores que no reconocen los huevos miméticos serán parasitados con más facilidad y no dejarán descendencia, destruida por el parásito. Con el tiempo, los hospedadores que sí reconocen los huevos mimetas predominarán en la población y destruirán los parásitos, salvándose, y seleccionándose, por tanto, aquellos que imiten mejor los puestos por las especies hospedadoras.

La biología y el comportamiento reproductor del críalo se conocían bien gracias a los estudios pioneros de José Antonio Valverde y, posteriormente, de Fernando Alvarez, ambos de la Estación Biológica de Doñana, y el equipo de Luis Arias de Reyna, de la Universidad de Córdoba. A principios de la década de los ochenta, comencé a estudiar el parasitismo del críalo en la Hoya de Guadix, comarca de la provincia de Granada; obtuve resultados y observé comportamientos que diferían de lo publicado hasta entonces, sobre todo en lo que respecta a los mecanismos de defensa del hospedador. La primera captura de un críalo allí había ocurrido en 1962. ¿Debíanse los resultados anómalos que yo había encontrado en esa zona a una colonización reciente del críalo? Sin duda.

Por otro lado, se venía sosteniendo hasta entonces que el críalo sólo aparece por debajo de los 500 metros sobre el nivel del mar, y la comarca de Guadix está situada entre los 900 y los 1100 metros. Nos hallábamos, pues, ante el primer caso documentado de simpatría reciente entre el críalo y la urraca. (Dos especies son simpátridas cuando coexisten en la misma zona en un tiempo determinado; son alopátridas cuando en un tiempo determinado no coexisten en la misma zona.) Se me ofrecía la oportunidad de estudiar el comportamiento de una población de parásitos que actúan sobre hospedadores cuyos mecanismos de defensa están poco desarrollados.

¿Qué ocurre en otras zonas de parasitismo arraigado? ¿Cuáles son los patrones de conducta? El críalo está considerado un parásito especialista,

neja. Comprobé que esas diferencias obedecían al gran tamaño de la corneja, casi doble que el de la urraca, lo que le confiere una doble ventaja. En primer lugar, los adultos llevan al nido más alimento del que el parásito puede consumir, y así quedará para los pollos de corneja que no morirán de hambre a los pocos días de nacer como suele acontecer con los de urraca; en segundo lugar, los pollos de corneja alcanzan el tamaño del pollo del parásito, e incluso lo superan, lo que les permite competir con garantía por el alimento.



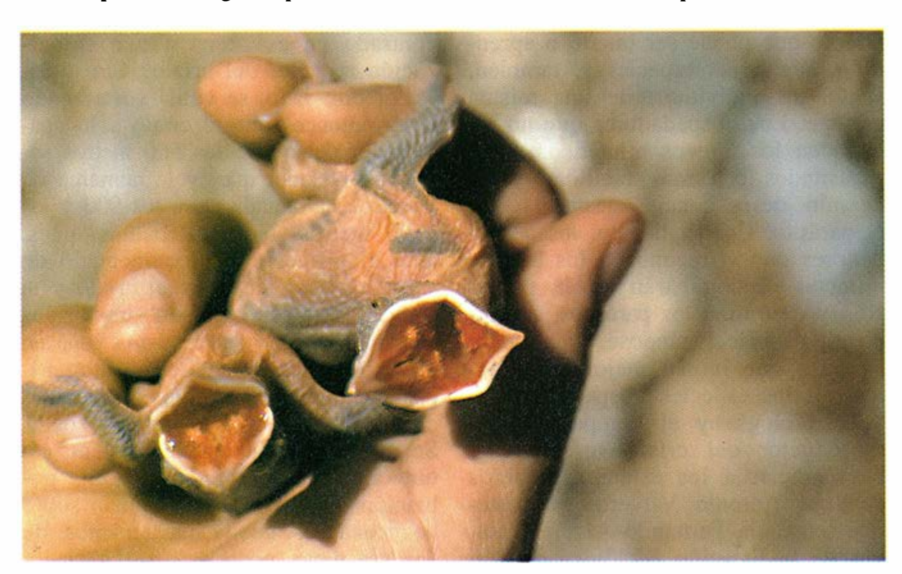
2. COLOR Y PARASITISMO. En el críalo, a diferencia de lo que ocurre con el cuco, la coloración de sus huevos no varía con la especie parasitada. Mantienen siempre el mismo patrón de coloración, cualquiera que sea el característico de los huevos de los hospedadores. Sólo existe mimetismo entre el huevo del críalo y el de urraca.

es decir, que utiliza de hospedadores a sólo una o muy pocas especies. En Europa parasita, de forma regular, sólo a la urraca (*Pica pica*); en la Hoya de Guadix se aprovecha de cuatro de las cinco especies de córvidos que crían en la zona: la urraca (su hospedador habitual), la corneja (*Corvus corone*), la grajilla (*Corvus monedula*) y la chova piquirroja (*Pyrrhocorax pyrrhocorax*); las tres últimas con menos frecuencia.

Se ignoraba que la grajilla y la chova piquirroja pudieran ser hospedadoras del críalo. Ambas especies de córvidos se hallan ampliamente distribuidas y medran en las zonas de simpatría antigua, pero sin ser parasitadas, lo que sugiere que los críalos exploran la posibilidad de utilizar nuevos hospedadores en áreas de simpatría reciente, donde estos hospedadores no han sido expuestos a las presiones selectivas del parasitismo con anterioridad.

La Hoya de Guadix queda dentro del área de distribución del críalo, aunque a una altitud superior a la que suele utilizar el ave. Su esfuerzo por expandir el rango de hospedadores en esta zona sirve para comprender su especialización en la urraca.

Comprobé que el éxito reproductor del críalo no superaba la mitad de su valor normal (el que obtiene con la urraca) cuando parasitaba la corneja.



3. POLLUELOS DE CRIALO, que presentan una serie de adaptaciones que les permiten vencer en su competencia con los pollos del hospedador: adelantándose en el nacimiento a los del hospedador, poseen mayor tamaño y presentan una cavidad bucal muy llamativa para los padres adoptivos.

En general, las especies parásitas son territoriales: cada pareja defiende su zona e impide la entrada en ella de otras parejas intrusas. Este sistema territorial permite a los cucúlidos parásitos controlar el número de huevos existentes por nido, debido a que cada hembra pone sólo un huevo en cada nido y, al defender su territorio, está impidiendo que otras hembras parasiten el mismo nido. El hecho de que exista sólo un huevo parásito por nido confiere dos importantes ventajas; primera, se evita la competencia entre ellos con presumible resultado de muerte para uno, y, segunda, el éxito reproductor tiende a ser mayor, ya que, al estar los huevos de las hembras muy repartidos, aumentan las posibilidades de que un mayor número de ellos escapen a la depredación.

Ese comportamiento general tiene su salvedad en el críalo. En la Hoya de Guadix he observado la presencia, en más de la mitad de los nidos, de más de un huevo, pudiendo darse cinco o incluso un número superior de huevos. He llegado a contar hasta 12 huevos de críalo en el mismo nido de urraca. Basado en la similaridad de los huevos de una misma hembra, advertí que, en el 50 por ciento de los nidos con más de un huevo, dos al menos los había dejado la misma hembra; en el 25 por ciento del total de nidos había huevos de más de una hembra. Si a esos datos agregamos la reiterada observación de adultos juntos en una zona sin muestras de interacción agresiva, habrá que concluir que el críalo no es territorial.

¿Qué beneficio obtiene el críalo poniendo más de un huevo? De entrada, el número de pollos parásitos que vuelan por nido es mayor conforme aumenta el número de huevos puestos. Además, el éxito reproductor en el área de simpatría reciente supera el valor medio de áreas de simpatría antigua, sobre todo en lo concerniente al éxito de eclosión

(porcentaje de huevos que eclosionan); mientras que en la Hoya de Guadix era de 63,2 por ciento, en otros estudios los resultados se hallan en torno al 40 por ciento.

No todos los huevos parásitos depositados en un mismo nido gozan de idénticas posibilidades de sobrevivir. El segundo huevo puesto tiene menos posibilidades de éxito (66,7 por ciento en una muestra de 12) que el primero (87,5 por ciento en una muestra de 24), el tercero menos posibilidades todavía (25 por ciento en una muestra de cuatro), en tanto que las del cuarto y siguientes son prácticamente nulas. Y esa pauta se cumple también en el caso de los huevos puestos por la segunda o sucesivas hembras.



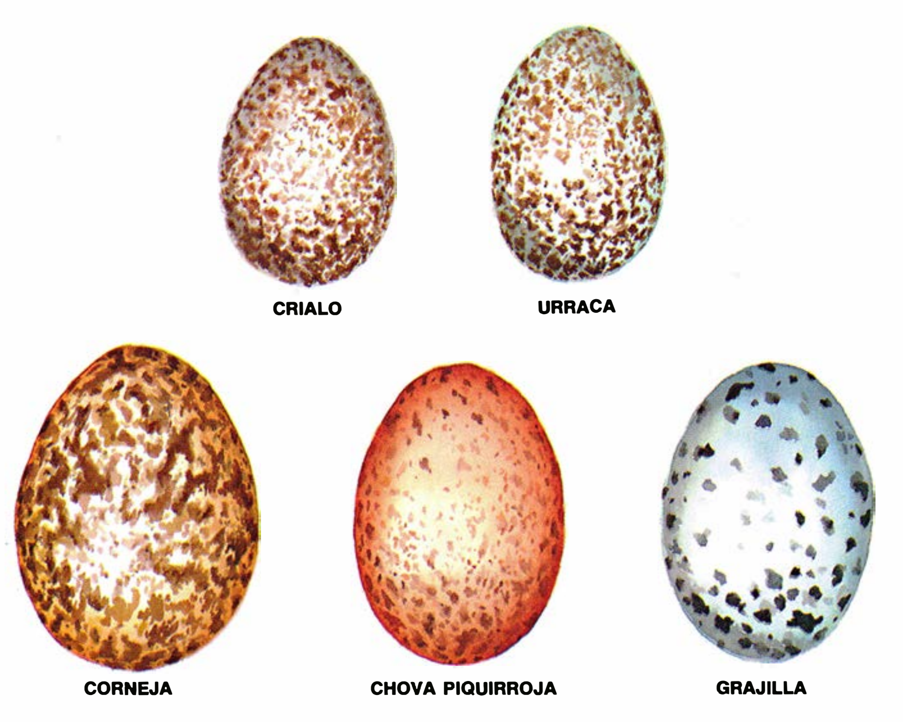
4. CHOVA PIQUIRROJA cebando a un críalo. Aunque éste parasita normalmente a la urraca, en las áreas de colonización reciente expande su gama a otros córvidos.

¿Se ha apreciado algún cambio de respuesta adaptativa por parte de las aves parasitadas por el críalo? Lo impreso es la normal capacidad de reconocimiento de los huevos propios y expulsión de los ajenos. Avanzados los años setenta, Fernando Alvarez y colaboradores, de la Estación Biológica de Doñana, habían comprobado esa capacidad en las urracas, en tanto que Yoram Yom-Tov, de la Universidad de Tel Aviv, demostraba que la corneja era incapaz de reconocer y expulsar los huevos distintos de los suyos, por dispares que fueran.

Para contrastar una y otra afirmación, acometí un experimento sencillo en la Hoya de Guadix. Puse en los nidos huevos de codorniz o de gallina pintados de colores llamativos, y observé que no eran rechazados, es decir, no eran reconocidos como foráneos, por la corneja, ni por la grajilla, chova o cuervo; sí lo eran por la urraca. El registro del comportamiento de ésta, sin embargo, ofrecía un porcentaje de expulsión menor del esperado: las urracas expulsaron sólo el 61 por ciento de los huevos experimentales (no miméticos), frente al casi cien por cien estimado en ambientes de simpatría antigua. En resumen, de todos los córvidos, sólo la urraca tiene capacidad de reconocimiento, es la especie parasitada de forma habitual por el críalo y muestra un porcentaje de rechazo menor en áreas de simpatría reciente.

Volvamos a retomar la pregunta esbozada antes, la relativa a la existencia de mecanismos adaptativos a la nueva situación. ¿Hay escondido ahí un proceso coevolutivo entre hospedador y parásito, entre urraca y críalo? En mi opinión, la urraca reconoce los huevos extraños porque constituye la especie que sufre la presión selectiva del parasitismo, menos onerosa en las demás. A medida que transcurre el tiempo de simpatría, la urraca va refinando su capacidad de reconocimiento y, extrapolando esa hipótesis hacia atrás, no distinguiría en un comienzo los huevos por poco miméticos que fueran.

Para respaldar experimentalmente tal punto de vista, me propuse con Anders Möller, de la Universidad de Uppsala, analizar la capacidad de reconocimiento y expulsión de los huevos de las urracas en tres zonas de duración de simpatría muy diferente: Santa Fe (provincia de Granada), zona donde los parámetros reproductores del críalo son normales, lo que nos permite suponer que se trata de un área de simpatría antigua; la Hoya de Guadix, de simpatría reciente, y Uppsala, zona muy alejada del área de distribución del críalo y donde, por consiguiente, sus poblaciones



5. CINCO HUEVOS DE CRIALO encontrados en un mismo nido de urraca. Como regla general, las aves parásitas son territoriales, lo que les permite controlar el número de huevos existentes en cada nido, ya que cada hembra pone un solo huevo por nido y, al defender el territorio, están impidiendo que otras hembras parasiten el mismo nido. En las áreas de colonización reciente, se encuentran varios huevos de críalo en un mismo nido, a veces de hembras distintas, tres en el ejemplo de la fotografía.

	RECHAZADOS	ACEPTADOS	PORCENTAJE DE RECHAZO
URRACA	19	12	61,3
CORNEJA	0	14	0
GRAJILLA	0	22	0
CUERVO	0	7	0
CHOVA PIQUIRROJA	0	11	0

6. RECHAZO Y ACEPTACION son expresiones del reconocimiento de los huevos, mecanismo éste de defensa de los hospedadores ante las aves parásitas. Los datos nos revelan que sólo la urraca es capaz de reconocerlos.

de urraca nunca ejercieron de hospedadores de tal parásito.

Utilizamos dos tipos de modelos. Para observar el reconocimiento de huevos no miméticos, huevos de codorniz pintados de rojo. Para observar el reconocimiento de huevos miméticos, los del críalo, que son muy parecidos a los de urraca, nos servimos de huevos artificiales fabricados de escayola a partir de moldes de caucho obtenidos de cinco huevos reales de críalo; más tarde pintamos, con pintura plástica, reproduciendo la coloración real, los huevos de escayola.

En cada zona se realizaron tres pruebas distintas: en un grupo de nidos introdujimos un modelo de huevo mimético; en otro, un modelo de huevo no mimético; y en el tercer grupo de nidos, mezclamos ambos modelos. Visitábamos los nidos al día siguiente, a los dos días y al quinto día de la introducción de los modelos; anotábamos las incidencias (si eran o no expulsados).

La respuesta de las urracas a la introducción de los dos tipos de huevos fue significativamente distinta en las tres zonas. Los huevos miméticos fueron expulsados en mayor proporción (78 por ciento) en Santa Fe, el área de simpatría antigua, presentándose valores bastante más bajos (14 por ciento) en Guadix, el área de simpatría reciente, mientras que en Uppsala, zona de alopatría, no fue expulsado ninguno. Los huevos no miméticos fueron reconocidos y expulsados en su totalidad (100 %) en Santa Fe, casi las tres cuartas partes (71 %) en Guadix y ninguno en Uppsala.

Con la diferencia entre zonas observamos también una diferencia de respuesta a los dos modelos: las urracas expulsan con mayor frecuencia los no miméticos que los miméticos en las dos zonas donde hay reconocimiento; y ambos tipos de modelos se expulsaban en proporción similar lo mismo cuando se ponían por separado que cuando se dejaban juntos en el mismo nido, si bien el rechazo comenzaba siempre por el modelo no mimético. De lo que se infiere que el reconocimiento de los huevos de críalo es más inmediato en el área de simpatría antigua, en tanto que los modelos no miméticos eran expulsados en una elevada proporción en ambas áreas de simpatría (antigua y reciente).

Con estos trabajos hemos avanzando en la identificación de los mecanismos evolutivos que afectan al reconocimiento de los huevos del parásito por parte de los hospedadores. Nick Davis y Michael Brooke, de la Universidad de Cambridge, pusieron en claro ese tipo de relaciones en el caso del cuco, al tiempo que observaron que las especies hospedadoras en poblaciones alopátridas toleran los huevos no miméticos mejor que las especies de poblaciones simpátridas e indicaron que el comportamiento de los hospedadores evoluciona en respuesta al comportamiento del parásito, en una juego constante de adaptaciones y contradaptaciones.

En nuestra investigación, además de demostrar que los mecanismos defensivos de la urraca se han desarrollado como respuesta a las presiones selectivas ejercidas por el parásito, hemos sacado a la luz la importancia de la duración de la simpatría, y, además, que, en un área nueva, cuando es colonizada por el críalo, el parásito se encuentra en una situación ventajosa frente a los hospedadores, parasita un porcentaje muy elevado de los nidos disponibles y obtiene un éxito reproductor mayor que en áreas de antigua simpatría, lo que sugiere que en estas zonas se produciría un elevado número de críalos que podrían seguir expandiéndose por nuevas áreas.

7. PARA COMPROBAR la hipótesis según la cual la duración de la simpatría influye directamente en la capacidad de reconocimiento de las urracas, el autor y Anders Möller, de la Universidad de Uppsala, introdujeron huevos miméticos y no miméticos en nidos de urracas de tres zonas de diferente duración de simpatría: antigua (Santa Fe), reciente (Hoya de Guadix) y simpatría cero (Uppsala). Ese gradiente temporal coincide con el porcentaje de huevos expulsados, señal clara de que los mecanismos de defensa de la urraca se han desarrollado en respuesta a la presión del parásito.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

RELATIONSHIPS BETWEENTHE GREAT SPOTTED CUCKOO (*Clamator glandarius*) AND ITS HOSTS IN A RECENTLY COLONIZED AREA. M. Soler en *Ornis Scandinavica*, volumen 21, págs, 212-223; 1990.

DURATION OF SYMPATRY AND COEVOLUTION BETWEEN THE GREAT SPOTTED CUCKOO AND ITS MAGPIE HOST. M. Soler y A. P. Möller en *Nature*, volumen 343, páginas 748-750; 1990.

Heisenberg, imprecisión y revolución cuántica

A sus 32 años, Werner Heisenberg fue uno de los científicos más jóvenes entre los galardonados con el Nobel. Tras uno de los principios fundamentales de la física, se halla una historia de ambición y feroz competencia

David C. Cassidy

Entre los muchos logros científicos del siglo XX, quizás el fundamental sea la mecánica cuántica. Ideada por un puñado de físicos europeos de mente preclara, la ciencia del átomo exige transformaciones profundas y controvertidas en nuestra comprensión de la naturaleza. La materia puede consistir en ondas o en partículas, según como la observemos; la causa y el efecto ya no están íntimamente conectados. Esta interpretación de la mecánica cuántica —las prescripciones sobre el cómo y el cuándo de su uso y sobre qué nos dice del mundo físico— fue elaborada en Copenhague en 1927. Debido a la difusión que le dieron sus creadores y al éxito sorprendente que obtuvieron sus partidarios, la interpretación de Copenhague adquirió ya en los años treinta el prestigio de que goza hoy. Pero una "interpretación" no es más que eso. Su origen, defensa y aceptación pudieron haber sido, en aspectos importantes, fruto de circunstancias históricas y preferencias personales, tanto como de su validez científica.

DAVID C. CASSIDY, profesor de la Universidad de Hofstra, ha intervenido en la edición de los *Collected Papers of Albert Einstein*. Se doctoró en historia de las ciencias por la Universidad de Purdue en 1976. Residió seis años en Alemania, primero como becario Alexander von Humboldt en la Universidad de Stuttgart y después como profesor asistente en la Universidad de Ratisbona, intervalo que le permitió acometer una investigación rigurosa sobre Heisenberg y la historia de la ciencia alemana. Acaba de aparecer, en la editorial W. H. Freeman and Company, su libro *Uncertainty: The Life and Science of Werner Heisenberg*.

El papel desempeñado en la ciencia por el talante del hombre queda ejemplificado, quizás como en ningún otro caso, en uno de los principales inventores y más activos defensores de la interpretación de Copenhague, Werner Karl Heisenberg. Ocurrió en febrero de 1927, y tenía 25 años, cuando este asistente postdoctoral de Niels Bohr formuló lo que constituye su contribución más famosa en el dominio de la física y es elemento clave para la interpretación de Copenhague: el principio de imprecisión o indeterminación. Como la interpretación de Copenhague, este principio puede considerarse el resultado de la búsqueda de un método coherente de conectar el mundo cotidiano del laboratorio con ese mundo, nuevo y extraño, propio del minúsculo átomo.

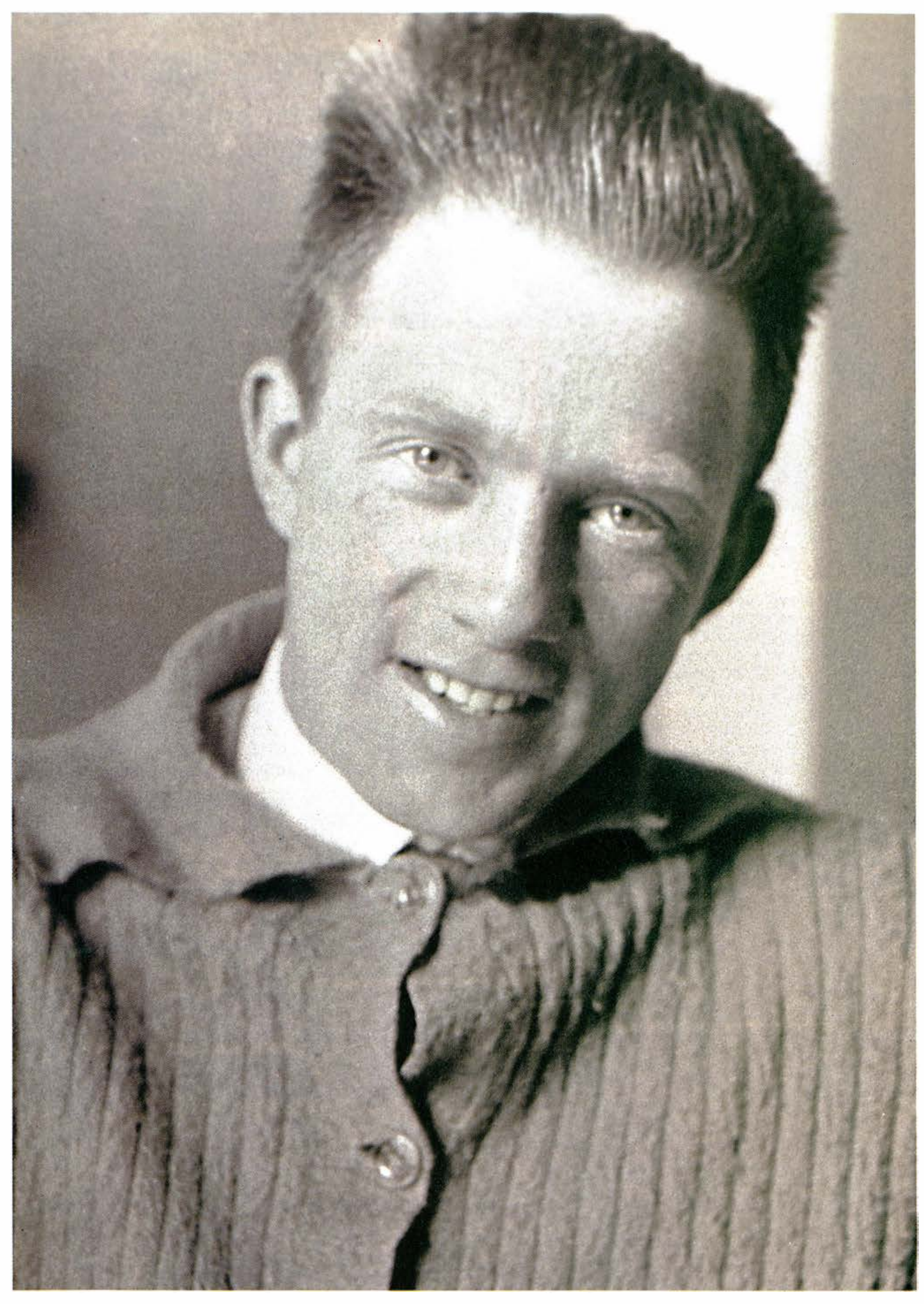
Dicho brevemente, el principio de imprecisión afirma que la medida simultánea de dos variables llamadas conjugadas, como la posición y el momento lineal de una partícula en movimiento, impone necesariamente una limitación en la precisión. Cuanto más precisa sea la medida de la posición, tanto más imprecisa será la medida del momento, y viceversa. En el caso extremo, la precisión absoluta de una de las variables implicaría imprecisión absoluta respecto a la otra. (N. del T.: Se traduce sistemáticamente por imprecisión el término inglés *uncertainty*, con el que vino a expresarse el adjetivo original alemán *unscharf*. Se pretende con ello eliminar toda acepción psicológica, de estado de la mente, que conlleva el término castellano incertidumbre. Tal acepción es totalmente ausente tanto en Heisenberg como en Cassidy.)

Esta indeterminación no debe achacarse al experimentador, sino que se trata de una consecuencia fundamental de las ecuaciones cuánticas y es característica de todo experimento cuántico. Más aún, Heisenberg declaró absolutamente inevitable el principio de imprecisión, en la medida en que fuera válida la mecánica cuántica. Era la primera vez, desde la revolución científica, que un físico de primera línea proclamaba una limitación al conocimiento científico.

Junto con las ideas de Bohr y Max Born (otras lumbreras), el principio de imprecisión de Heisenberg constituía el sistema lógicamente cerrado de la interpretación de Copenhague, que Heisenberg y Born proclamaron completa e irrevocable ante una reunión de los principales físicos cuánticos en octubre de 1927, con motivo del quinto congreso Solvay sobre física fundamental celebrado en Bruselas. A las pocas semanas de ese acontecimiento, Heisenberg fue nominado para la cátedra de física teórica de la Universidad de Leipzig. Con sólo 25 años, era el catedrático más joven de Alemania.

La extrema juventud de Heisenberg en el momento de su obra más significativa señala un rasgo característico que habría de definir a toda su investigación de primera hora: el ansia casi insaciable de éxito académico y la necesidad de destacar como el mejor en todo lo que hacía. De ese estado de ánimo podemos rastrear su explicación hasta el entorno familiar.

Los Heisenberg eran una familia muy culta y ambiciosa, que fue escalando peldaños hasta instalarse en la clase media alta de la sociedad germana. La unificación de Alemania bajo Otto von Bismarck hacia finales del siglo XIX, con el vigoroso crecimiento consiguiente de la economía, había creado una apremiante necesidad de burócratas, diplomáticos, jue-



1. WERNER HEISENBERG realizó sus principales aportaciones a la física cuando apenas contaba ventitantos años de edad. La fotografía se tomó hacia 1924, en la Universidad de Gotinga, donde impartió la clase que le habilitó para una cátedra.


a
b
c
d
e
f
g
h

ces, abogados y empresarios. En consecuencia, las nuevas universidades y escuelas conocieron un espectacular despegue. Y se prestigió el reconocimiento y la remuneración económica de los docentes y de sus alumnos más brillantes.

Tanto el padre de Werner, August, como su abuelo materno, Nikolaus Wecklein, se habían remontando desde sus orígenes humildes hasta la cumbre de la alta burguesía alemana mediante logros académicos. Wecklein era director de un renombrado instituto (Gymnasium) de Munich, y August en 1910 fue nombrado profesor de filología bizantina en la Universidad de Munich. Ambos contrajeron matrimonio dentro de su nueva situación social.

Desde su mismo nacimiento en 1901, la familia de Werner decidió que él persistiera también en ese nivel privilegiado mediante una cómoda situación académica. Creyendo que la competencia alentaría el éxito en los estudios, August estimuló la rivalidad entre Werner y su hermano mayor, Erwin. Durante años los dos muchachos pugnaron sin cuartel, hasta que un día la lucha acabó en una pelea violenta con las sillas como armas. Llegados a la edad adulta, cada uno siguió su propio camino —Erwin se trasladó a Berlín y se hizo químico— y, fuera de esporádicas reuniones familiares, tuvieron poco contacto.

La ambición de Werner por alcanzar la cumbre se evidencia con claridad durante el período comprendido entre julio de 1925, cuando desarrolló, con sus colegas Born y Pascual Jordan, una descripción matemática de la mecánica cuántica, y febrero de 1927, cuando formuló las relaciones de imprecisión. La confluencia de dos procesos convirtió en determinante ese afán durante dicho intervalo.

En primer lugar, varias cátedras de física teórica quedaron de repente vacantes en la Europa central de lengua alemana. Esos cargos constituían una gran oportunidad para un académico ambicioso como Heisenberg, que ya se había habilitado en la Universidad de Gotinga, es decir, había sido reconocido apto para ocupar una cátedra de enseñanza universitaria.

En segundo lugar, y quizá más importante, fue la aparición de una descripción matemática nueva y rival de la mecánica cuántica. Heisenberg y sus colegas habían desarrollado en 1925 un formalismo de la mecánica cuántica, basado en las matemáticas abstractas del cálculo matricial. Para sus autores, esta "mecánica matricial" incardinaba su voluntad de fundarse, de manera exclusiva, en magnitudes observables en el laboratorio. Sostenían puntos esenciales como la existencia de saltos cuánticos y discontinuidades en los átomos, y rechazaban la idea de modelos atómicos visualizables (*anschaulich*).

Erwin Schrödinger, un físico vienés de 39 años que trabajaba entonces en Zurich, atacaba los enigmas de la física atómica desde un punto de vista totalmente distinto y con objetivos enteramente otros. En una serie de artículos publicados durante la primera mitad de 1926, Schrödinger presentaba una ecuación de ondas cuántica, basada en una hipótesis que había propuesto el doctorando francés Louis de Broglie. La idea, recibida favorablemente por Einstein, era que toda materia en movimiento podía considerarse como ondas. Schrödinger, sirviéndose de esa noción, aducía que las "ondas de materia" del electrón excitaban modos armónicos de vibración en el interior del átomo. Estos armónicos reemplazaban los estados atómicos estacionarios de la teoría matricial; en vez de saltos cuánticos discontinuos, había transiciones continuas de un armónico a otro. Si eso era verdad, Schrödinger tornaba inútiles los puntos fundamentales de la mecánica matricial de Heisenberg.

La mayoría de los físicos acogieron con satisfacción el enfoque más familiar de Schrödinger, atendiendo poco a su manera de interpretarlo. Esta situación cambió bruscamente en mayo de 1926, cuando Schrödinger publicó una prueba de que los dos formalismos rivales eran, de hecho, matemáticamente equivalentes. Heisenberg y sus colegas matriciales repusieron su causa y lo hicieron en términos que fueron adquiriendo por ambas partes tonos emocionales crecientes.

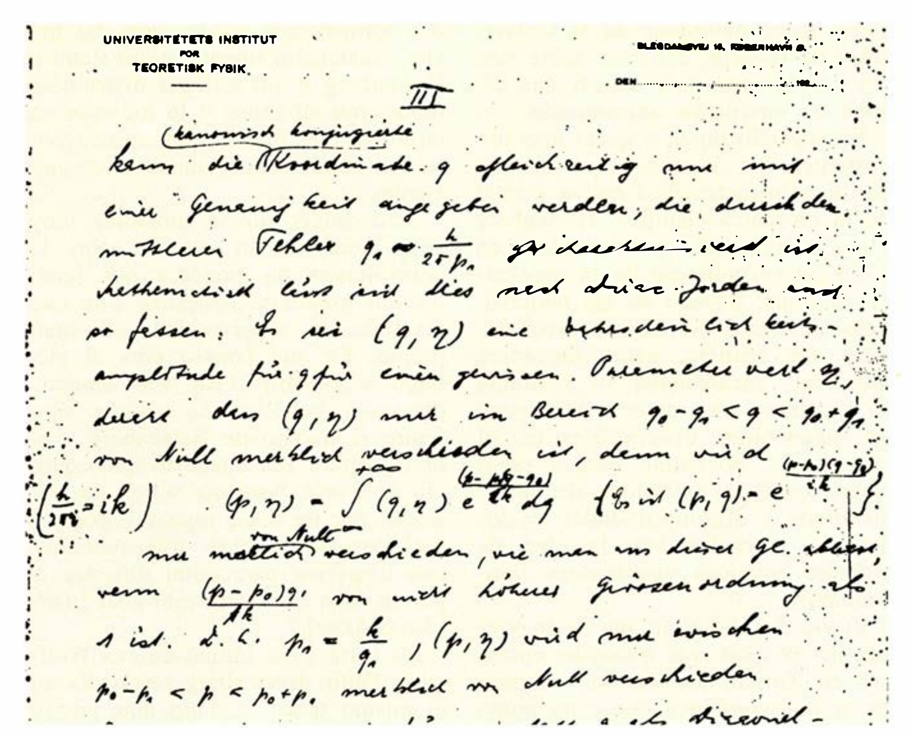
Schrödinger no se mostraba muy cooperador. En su artículo sobre la equivalencia no pondera por igual los dos esquemas opuestos, sino que resaltaba la superioridad del suyo propio. En una famosa nota al pie, llegó a escribir: "No veo ninguna conexión genética de ningún tipo [entre el trabajo de Heisenberg y el mío propio]. Por supuesto que conocía su teoría, pero me sentía desanimado, por no decir repelido, por los métodos de álgebra trascendental, que a mí me parecieron difíciles, y por la falta de visualizabilidad [*Anschaulichkeit*]."

En carta a su íntimo colega Wolfgang Pauli, Heisenberg respondía en el mismo tono: "Cuanto más pienso en el aspecto físico de la teoría de Schrödinger, más repulsiva la encuentro... Lo que escribe Schrödinger sobre la visualizabilidad de su teoría 'probablemente no es del todo correcto' [eco de una expresión típica de Bohr], en otras palabras, es basura [*Mist*]." La única ventaja del método de Schrödinger, decía a quien quisiera oírlo, es que permite un cálculo simple de las probabilidades de transición atómicas, o probabilidades de saltos cuánticos, para poder insertarlas en las matrices de la mecánica cuántica. Pauli estaba de acuerdo.

Una lectura detenida de las observaciones nos revela que lo que provocó el conflicto no era la equivalencia (Pauli la había probado sin más ni más un mes antes), sino lo que cada bando sacaba de ella. Heisenberg y su escuela matricial se habían empeñado a fondo en las propiedades de la naturaleza que creían existir y estar incorporadas en su mecánica matricial. Habían apostado su futuro en ese enfoque. Schrödinger había arriesgado su reputación en eliminar la discontinuidad y los saltos cuánticos al parecer irracionales, resucitando la física de los movimientos ondulatorios, racionales, causales y continuos. Ninguno de los dos bandos estaba dispuesto a conceder al otro la superioridad, y su probable consecuencia —el predominio profesional—. Se debatía nada menos que la naturaleza de la orientación futura de la mecánica cuántica.

Este desacuerdo espoleó aún más

2. PERSONAS QUE INFLUYERON en la vida de Heisenberg. Debemos empezar por su abuelo, Nikolaus Wecklein (*a*), y su padre, August, que aparece con su esposa, Anna, y sus hijos, Erwin (*de pie*) y Werner (*b*). Abuelo y progenitor inculcaron afán de triunfo académico en los dos muchachos. Heisenberg estudió con Niels Bohr (*c*), con quien más tarde desarrolló la interpretación de Copenhague. Uno de los primeros rivales de Heisenberg fue Erwin Schrödinger (*d*), cuyo formalismo ondulatorio constituía un reto a la mecánica matricial, elaborada por Heisenberg con Max Born (*e*) y Pascual Jordan (*f, a la derecha*). Wolfgang Pauli (*g*) fue una fuerza de primer orden, que ayudó a Heisenberg a elaborar el principio de imprecisión en 1927. En 1929 Heisenberg se embarcó en una vuelta al mundo docente para difundir el "espíritu de Copenhague", llegando a los Estados Unidos, Japón, China y, finalmente, la India (*h*).



UNIVERSITETETS INSTITUT FOR TEORETISK FYSIK

BLEGDAMSVEJ 15, KØBENHAVN Ø.

III

3. CARTA ESCRITA por Heisenberg a Wolfgang Pauli, en que deriva las relaciones de imprecisión para p y q, donde $p_1 = \sqrt{2}\,\Delta p$ y $q_1 = \sqrt{2}\,\Delta q$. Este fragmento, tomado de una carta de 14 páginas, fue la base de su artículo sobre el principio de imprecisión.

la ambición académica de Heisenberg. Una semanas antes de que Schrödinger publicara su prueba de la equivalencia, Heisenberg había renunciado a una plaza de profesor en Leipzig, en favor del puesto de asistente de Bohr en Copenhague. El incrédulo abuelo de Werner, Wecklein, se apresuró a viajar a Copenhague para disuadir a su nieto de tomar dicha opción, justamente cuando aparecía el artículo de Schrödinger sobre la equivalencia. La presión renovada de Wecklein y el desafío de Schrödinger a las bases de la física matricial redoblaron los esfuerzos de Heisenberg por producir un trabajo de tan alta calidad, que pudiera adquirir amplia reputación profesional y le permitiera, en última instancia, hacerse con alguna otra cátedra vacante.

Pero al menos tres sucesos de 1926 ahondaron el profundo abismo intelectual entre sus propias ideas y el punto de vista de Schrödinger. El primero fueron las conferencias de Schrödinger en Munich sobre su nueva física, a fines de julio. Allí, mezclado en una audiencia multitudinaria, el joven Heisenberg objetaba que la teoría de Schrödinger dejaba sin explicar diversos fenómenos. No logró convencer a nadie, y abandonó desalentado la sala. A continuación, durante la reunión de otoño de los científicos y médicos alemanes, Heisenberg fue testigo del soporte abrumador —y a su juicio desquiciado— en favor de las concepciones de Schrödinger.

Por último, en octubre de 1926 se produjo un tenso debate, aunque en último término inconcluso, entre Bohr y Schrödinger en Copenhague. El resultado final de la disputa fue el reconocimiento de que no se disponía de ninguna interpretación enteramente aceptable, ni del uno ni del otro formalismo cuántico. Quien encontrara tal interpretación, fuera persona o bando, podría dar cumplimiento, expresaba Bohr abiertamente, a sus "deseos" de cómo debiera ser la física del futuro.

Puestas en marcha estas diversas motivaciones —personales, profesionales y científicas—, Heisenberg creyó, en febrero de 1927, haber dado de repente con la interpretación necesaria: el principio de imprecisión. Su progreso intelectual hacia esta idea, a finales de 1926 y principios de 1927, se apoya en la investigación de sus colegas más próximos, especialmente de Jordan y de Paul A. M. Dirac, quienes formularon a la vez la "teoría de transformaciones", una amalgama de matemática ondulatoria y matricial. El objetivo para Heisenberg y sus aliados era, en aquel momento, descubrir un método irrefutable para incorporar las discontinuidades en el formalismo de Dirac y Jordan.

De Pauli recibió Heisenberg un impulso vigorosísimo para la nueva interpretación. En una carta de 19 de octubre de 1926, al tiempo que le informaba de una cátedra vacante en Leipzig, Pauli aplicaba los estados atómicos estacionarios al primer estudio de Born de ondas electrónicas libres. Según sus resultados, han de elegirse variables continuas para el momento lineal p y la posición q de un electrón atómico, pero en su comportamiento cuántico se manifestaba un "punto negro": "Ha de darse por sentado que las variables p están *controladas* y las q *incontroladas*. Esto es, sólo se pueden calcular las probabilidades de determinados cambios de las variables p, para unas condiciones iniciales dadas, y *promediando sobre todos los valores posibles de las variable q*." Por tanto, no se puede hablar de un determinado "'camino' de la partícula", escribía Pauli, ni "se puede preguntar simultáneamente sobre el valor de la variable p y la variable q".

Heisenberg respondió que estaba "*muy* entusiasmado" con la carta de Pauli y con ese punto negro, sobre el que hubo de reflexionar una y otra vez durante los meses siguientes. El entusiasmo de Heisenberg culminó en una carta de 14 páginas, enviada a Pauli el 23 de febrero de 1927. En ella presentaba prácticamente todos los elementos esenciales del artículo, que enviará a publicar un mes más tarde, titulado "Sobre el contenido intuitivo [*anschaulich*] de la cinemática y la mecánica teórico-cuánticas": el artículo de Heisenberg sobre la imprecisión.

Habiendo deducido las relaciones de imprecisión a partir de razonamientos matemáticos y a partir de experimentos mentales, Heisenberg consideró la concordancia entre ambas deducciones como una prueba de la validez universal de la imprecisión. El argumento matemático comenzaba con una función de ondas correspondiente a una curva en forma de campana o, dicho matemáticamente, a una distribución de probabilidad gaussiana, para la variable q. El error en el conocimiento del valor exacto de q (llamado la desviación estándar) es delta q, que escribimos Δq. Usando el formalismo desarrollado por Dirac y Jordan, transformó Heisenberg la distribución gaussiana en la de su variable conjugada p.

Al hacerlo, descubrió que, como consecuencia matemática, las desviaciones estándar de las dos distribuciones —es decir, las imprecisiones en los valores de q y p— están en relación inversa una respecto a otra. Este ca-

rácter inverso puede generalizarse y expresarse mediante la relación

$$\Delta p \bullet \Delta q \geq \frac{h}{4\pi},$$

donde h es la constante de Planck. A continuación demostró que este resultado no es mero constructo matemático, sino enteramente compatible con cualquier experimento imaginable que implique la medición simultánea de pares de variables conjugadas, como posición y momento lineal, o energía y tiempo.

La compatibilidad con el experimento se basaba, sin embargo, en diversas innovaciones que Heisenberg introducía al objeto de incorporar la discontinuidad y las partículas. Una de ellas era la redefinición del término alemán *anschaulich* (intuitivo) que aparecía en el mismo título de su artículo, para significar "físico" o dotado de significado empírico, más que "visualizable" o pictórico. Con este cambio pretendía neutralizar las críticas de Schrödinger, de que una física de partículas discontinua es esencialmente irracional y *unanschaulich* (no-intuitiva). Lo que se hallaba en íntima relación con otra innovación: una redefinición de conceptos clásicos, como posición, velocidad y trayectoria de una partícula atómica, en función de las operaciones experimentales usadas para medirlas, una forma de operacionalismo. Sólo lo que el físico puede medir tiene significado real, y estas mediciones manifiestan siempre las relaciones de imprecisión.

Para el joven Heisenberg, el principio de imprecisión culminaba y completaba la revolución cuántica, una revolución que incorporaba sus compromisos personales con los fundamentos que él mismo había ayudado a establecer. Y, como para hacer callar toda objeción sobre este punto, concluía su artículo publicado con algunas pretensiones que iban mucho más allá del razonamiento matemático y el experimento mental. Con la teoría de transformaciones de Dirac-Jordan, declaraba, el formalismo cuántico queda completo y resulta inalterable; las relaciones de imprecisión son verdaderas e irrefutables, porque son una consecuencia directa del formalismo. Todas las observaciones experimentales anteriores y futuras de fenómenos atómicos están así sometidas a tal interpretación.

Más aún, razonaba, aunque la física cuántica contenga un elemento estadístico básico, éste no es una propiedad de la naturaleza misma. Aparece en virtud de la perturbación causada por los intentos del físico para observar la naturaleza. Finalmente, presentaba su primera afirmación explícita sobre la consecuencia más profunda de la imprecisión: un desafío a la causalidad.

El principio de causalidad requiere que todo efecto sea precedido por

El experimento mental con el microscopio de rayos gamma

Para demostrar el principio de imprecisión, Heisenberg ofreció un experimento mental. Usando un microscopio cuya resolución era alta, por basarse en rayos gamma para su iluminación, intentó mostrar que la posición y el momento lineal del electrón obedecían al principio de imprecisión. Aunque Heisenberg logró los resultados correctos, Bohr le señaló que el experimento original descuidaba dos puntos esenciales: el poder de resolución del microscopio y la dualidad onda-corpúsculo.

En la versión correcta, un electrón libre está directamente debajo de la lente (el objetivo) del microscopio. El objetivo circular forma un cono de ángulo 2Θ con vértice en el electrón. El electrón es iluminado por un rayo gamma proveniente de la izquierda. Según un principio de óptica ondulatoria, el microscopio tiene capacidad de resolución para objetos de hasta un tamaño Δx, relacionado con Θ y con la longitud de la onda, λ, mediante la expresión

$$\Delta x = \frac{\lambda}{2\,\mathrm{sen}\Theta}.$$

En el momento en que la luz se difracta en el objetivo del microscopio, el electrón retrocede hacia la derecha. Después de la colisión, el rayo gamma observado podría haberse dispersado con un ángulo cualquiera dentro del cono 2Θ. En el caso extremo de dispersión hacia adelante (hacia la derecha) sobre el borde de la lente, el momento lineal en la dirección x sería

$$p'_x + \frac{h}{\lambda'}\,\mathrm{sen}\Theta,$$

donde p'_x es el momento lineal del electrón en la dirección x, λ' es la longitud de onda del rayo gamma desviado, h es la constante de Planck (que relaciona la frecuencia del fotón con su energía), y $\frac{h}{\lambda}$ es el momento lineal total del fotón rayo gamma, según lo definen los principios cuánticos. En el otro extremo, el rayo gamma se dispera hacia atrás, impactando justamente el borde izquierdo de la lente. En este caso, el momento lineal total en la dirección x es

$$p''_x \frac{h}{\lambda''}\,\mathrm{sen}\Theta.$$

El momento lineal final en la dirección x ha de ser en ambos casos igual al lineal; por consiguiente,

$$p'_x + \frac{h}{\lambda'}\,\mathrm{sen}\Theta = p''_x - \frac{h}{\lambda''}\,\mathrm{sen}\Theta.$$

Si Θ es pequeño, entonces es $\lambda' \sim \lambda'' \sim \lambda$,

$$p''_x - p'_x = \Delta p_x \sim \frac{2h}{\lambda}\,\mathrm{sen}\Theta.$$

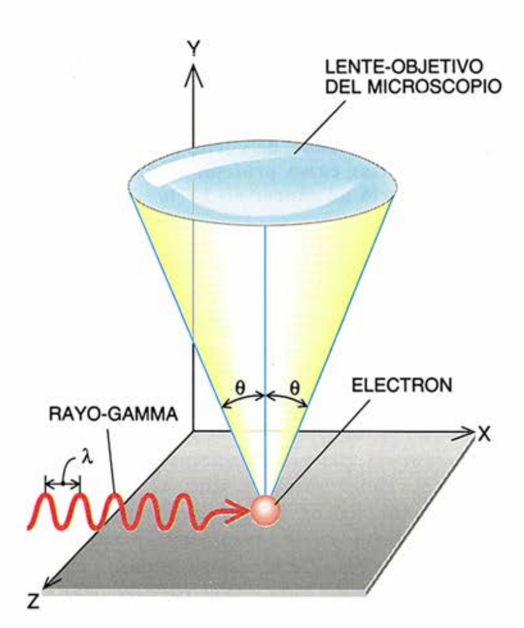
Puesto que $\Delta x = \frac{\lambda}{2\,\mathrm{sen}\Theta}$, existe una relación inversa entre la imprecisión mínima en la medida de la posición del electrón a lo largo del eje x y la de su momento lineal en la dirección x:

$$\Delta p_x \sim \frac{h}{\Delta x}.$$

Para imprecisiones mayores que ese mínimo, puede introducirse una desigualdad

$$\Delta_x \blacksquare \Delta x \gtrsim h,$$

que aproxima la relación de imprecisión de Heisenberg.



una causa única. Esta idea había servido durante más de un siglo como hipótesis básica de prácticamente todas las formas de investigación racional. Se le reconoce al matemático francés Laplace la definición quizás más simple de causalidad, en su aplicación a la mecánica newtoniana: Si sabemos con exactitud la posición y el momento lineal de una partícula en un instante dado, conociéndose además todas las fuerzas que actúan sobre la partícula, su movimiento queda entonces completamente determinado por las ecuaciones mecánicas para todo el futuro.

El principio de imprecisión, asevera Heisenberg, niega eso. "En la formulación estricta de la ley causal —si conocemos el presente, podemos calcular el futuro— no es falsa la conclusión, sino la premisa." Los valores iniciales del momento lineal y la posición no pueden ser simultáneamente medidos con absoluta precisión. Razón por la cual, sólo puede calcularse una gama de posibilidades para la posición y el momento lineal de la partícula en un cierto tiempo futuro. Del movimiento real de la partícula resultará, sin embargo, una única posibilidad. La conexión causal entre presente y futuro se pierde, y las leyes y predicciones de la mecánica cuántica resultan de naturaleza puramente probabilística, o estadística.

El artículo de Heisenberg sobre el principio de imprecisión era profundo y trascendental en casi todos sus aspectos. Además de satisfacer estrictamente sus propósitos, el artículo de Heisenberg estaba "cortado a su medida". Cuando su mentor, Bohr, le señaló un error en el argumento, Heisenberg defendió su posición obstinadamente en una batalla que en la primavera de 1927 degeneró en lo que Heisenberg llamó "gran malentendido personal". El error implicaba la confianza absoluta de Heisenberg en la discontinuidad y los aspectos corpusculares del cuanto de luz, en uno de sus experimentos mentales básicos, el llamado microscopio de rayos gamma.

Bohr, que había estado de vacaciones en la nieve, se encontró sobre la mesa, a su regreso, el borrador del artículo de Heisenberg. Al enviárselo a Einstein, cumpliendo el ruego de Heisenberg, Bohr se le quejaba de que el enfoque del autor pecaba de excesiva estrechez y que el microscopio de rayos gamma era falso de arriba abajo, aunque el resultado fuera correcto. Para Bohr, las relaciones de imprecisión no surgían sólo del formalismo, de las re-definiciones de los conceptos clásicos y de la primacía de la discontinuidad y los corpúsculos sobre las ondas continuas. También eran decisivas la dualidad onda-partícula y, en el microscopio de rayos gamma, la dispersión de ondas de luz sobre el electrón dentro del objetivo del microscopio.



4. HEINSEBERG a los 65 años, de vuelta a Leipzig para impartir un curso de conferencias como profesor invitado. Cayó enfermo años más tarde y murió de cáncer en 1976.

Las imágenes ondulatoria y corpuscular eran complementarias una de otra, descripciones mutuamente exclusivas pero conjuntamente esenciales. Bohr objetaba que el experimentador ha de elegir o la imagen ondulatoria o la corpuscular, para analizar con ella el experimento. El precio a pagar por dicha opción producía una restricción sobre lo que podía enseñarnos el experimento, limitación que venía representada por las relaciones de imprecisión. Para Bohr, el argumento de Heisenberg era tan sólo un caso particular de lo que Bohr iba llamando ya complementariedad.

Heisenberg estaba en vehemente desacuerdo. Insistiendo en el empleo primordial de partículas y discontinuidad, rechazó de plano la sugerencia que le hizo Bohr de retirar su artículo; lo había enviado en el ínterin a su publicación. Heisenberg no podía tolerar un uso extensivo de ondas o de nociones de mecánica ondulatoria, ni podía dejar de publicar su propia y más importante contribución al debate de la interpretación. La subsiguiente batalla con Bohr se hizo tan intensa que, según se dice, durante uno de estos encuentros Werner estalló en lágrimas e incluso consiguió ofender al imperturbable Bohr con algunas observaciones duras. Evidentemente había muchas cosas en juego para el joven de 25 años: sus nuevas concepciones, sus planes académicos y quizá también su deseo de paridad intelectual con sus mentores. En mayo apareció su artículo en una de las principales revistas de física alemanas, sin ninguna revisión; sí agregaba un breve postscriptum, donde admitía el error del microscopio y llamaba la atención del lector sobre algunos puntos esenciales del razonamiento de Bohr.

Cuatro meses más tarde, Heisenberg había enjugado ya sus ojos y cambiado de tono: parecía estar agradecido por la crítica de Bohr. Tras ofrecer Bohr su primera presentación de la complementariedad ante una audiencia reunida en el lago Como en septiembre de 1927, Heisenberg, antes tan seguro de su imprecisión, brindó a Bohr el primero de sus generosos reconocimientos. En la versión publicada de la discusión que siguió al artículo de Bohr en Como, Heisenberg le agradeció por esclarecer la imprecisión "en todos sus detalles" y por enunciar lo que vino a conocerse como la interpretación de Copenhague.

El cambio de corazón en Heisenberg pudo haberse iniciado con la realización de su ambición. Porque el mismo mes del congreso de Como, se enteró de su inminente llamada a la cátedra de Leipzig. Al menos habíase cumplido esa meta.

Al apaciguarse en Heisenberg el deseo de demostrar su capacidad y sus aportaciones a la mecánica cuántica, surgió en él otro que ahora incluía a Bohr: la voluntad de crear en Leipzig un programa de investigación permanente y de primera línea, basado en la física. Además de reforzar lo defectuosamente argumentado sobre la imprecisión, las explicaciones de Bohr proporcionaban un punto de apoyo para los seguidores del danés que, como Heisenberg, estaban ansiosos por una física completa que poder propagar desde sus cátedras recién adquiridas y explotar en sus artículos. Heisenberg y otros discípulos de Bohr ya no prestaron su fidelidad a programas y descubrimientos individuales, como la mecánica matricial o la imprecisión, sino al "espíritu de Copenhague".

Heisenberg y otros consiguieron asegurar la aceptación de su interpretación, a pesar de las prolongadas objeciones de Einstein y Schrödinger. Durante la media década que siguió a la reunión de Como y el ulterior congreso Solvay, Heisenberg y su instituto produjeron teorías cuánticas muy importantes: cristales de estado sólido, estructura molecular, dispersión de radiación por núcleos, y la estructura neutrónico-protónica de los núcleos. Con otros expertos, dieron pasos de gigante hacia una teoría cuántica de campos relativista y sentaron los fundamentos de la investigación sobre física de altas energías.

Tales éxitos atrajeron a los mejores alumnos hacia institutos como el de Heisenberg. Esos estudiantes, amamantados con la doctrina de Copenhague, formaron una nueva generación de físicos, predominante, que difundieron por todo el mundo esas ideas, cuando el ascenso de Hitler al poder, en los años treinta, les obligó a emigrar y dispersarse.

Heisenberg y otros de la escuela de Copenhague no consumieron mucho tiempo en explicar su doctrina a los que no viajaron a los institutos europeos. Aquél, en particular, encontró en los Estados Unidos un campo fértil para el proselitismo. Durante una vuelta alrededor del mundo con Dirac en 1929, Heisenberg impartió en la Universidad de Chicago unas clases sobre la doctrina de Copenhague que tuvieron un enorme impacto. En el prólogo a la publicación de esas clases, escribió: "El objetivo de este libro me parece que quedará alcanzado, si contribuye de alguna manera a la difusión de este *Kopenhagener Geist der Quantentheorie*... [espíritu de Copenhague de la física cuántica...], que ha dirigido todo el desarrollo de la moderna física atómica."

El suministrador de ese *espíritu* retornó a Leipzig con sus primeros compromisos científicos, esta vez ampliamente aceptados por una profesión que le proporcionó posiciones prominentes en el aspecto institucional y en el aspecto científico. En 1933 la profesión le otorgó a Heisenberg, con Schrödinger y Dirac, el reconocimiento supremo de su trabajo: el premio Nobel.

Aunque se le celebre, con toda justicia, como uno de los físicos más eminentes de los tiempos modernos, no han faltado voces que le han criticado su comportamiento tras la subida de Hitler al poder. No militó nunca en el partido nacionalsocialista, pero ocupó cargos académicos de altísimo rango y se convirtió en interlocutor de la cultura alemana en los territorios ocupados. Rechazando repetidos ofrecimientos de emigración, dirigió el principal esfuerzo de investigación sobre la fisión del uranio para el Tercer Reich. Después de la guerra ofreció diversas explicaciones de sus actividades, que empañaron aún más su reputación en el extranjero. La enigmática yuxtaposición de ese comportamiento cuestionable y una física brillante refleja los delicados compromisos del científico y la ciencia durante un siglo turbulento y a veces brutal. Hijo leal de Alemania, Heisenberg, que veía tan profundamente en la naturaleza, encontró difícil distinguir y aceptar cuán trágicamente se había descarriado su país. Murió de cáncer de riñón y vesícula biliar en su casa de Munich en 1976.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE SHAKY GAME: EINSTEIN, REALISM AND THE QUANTUM THEORY. Arthur Fine. University of Chicago Press, 1986.

SCHRÖDINGER: LIFE AND THOUGHT. Walter J. Moore. Cambridge University Press, 1989.

NIELS BOHR'S TIMES: IN PHYSICS, PHILOSOPHY AND POLITY. Abraham Pais. Oxford University Press, 1991.

UNCERTAINTY: THE LIFE AND SCIENCE OF WERNER HEISENBERG. David C. Cassidy. W. H. Freeman and Company, 1991.



RESTOS QUE HABLAN

Philip E. Ross



Los ácidos nucleicos y las proteínas que se encuentran en vetustas momias y en huesos aún más antiguos constituyen los cofres donde se encierran los secretos de nuestra prehistoria. La biología molecular podría tener la llave.

"Los familiares de este pobre desgraciado querrán saber qué le pasó", pensaba Helmut Simon mientras fotografiaba el cadáver que él y Erika, su mujer, acababan de encontrar asomando entre los hielos semiderretidos de un glaciar tirolés, durante sus vacaciones estivales del año pasado. ¡Pues sí que acertaba! Lo más seguro es que el cuerpo en cuestión tenga una antigüedad de 5000 o 5500 años y sea, posiblemente, el de un antepasado de millones de europeos actuales. Los especialistas se pelearon por tener acceso a los restos mortales y a los útiles del Hombre del Glaciar, única momia conocida de la Edad de Piedra.

Por más revuelo que haya levantado ese hallazgo, constituye una única pincelada en un cuadro que se va formando lentamente con millares de ellas. En ciertos yacimientos propicios, desde los desiertos del Africa del Norte, del Perú y del Suroeste de América hasta las turberas de Dinamarca, Gran Bretaña y Florida, emergen con frecuencia a la superficie arcaicos restos mortales que parecen extrañamente vivos, a veces con sus vestimentas, armas y vituallas; pudiéndose incluso discernir en algunos casos, por el contenido del estómago, los componentes de su última pitanza. Considerados durante mucho tiempo meras curiosidades, o abocados al mortero de la botica, multitudes de estos momificados mensajeros de épocas remotas han sido salvajemente destruidos o vueltos a enterrar. Los que se han conservado se hallan ahora sometidos a una exhaustiva investigación.

El silencio de la tumba se ha convertido en un anacronismo poético. Lejos de ser mudos, los restos antiguos dan elocuente testimonio a quienes saben prestarles atención. A lo largo de los últimos diez años, los bioquímicos han descubierto la manera de arrancar las moléculas de la vida de los restos orgánicos, una vez separados éstos del polvo inerte. Se han recuperado proteínas y ácidos nucleicos de plantas que vivieron hace millones de años y de animales que respiraron hace decenas de milenios. Y lo más alentador de todo, se buscan, y se encuentran, claves moleculares no sólo en cuerpos que han persistido más o menos enteros, sino también en secos huesos, lo que

1. MOMIA EGIPCIA PREDINASTICA, del cuarto milenio a.C., colocada en una reconstrucción de la tumba en que se la encontró. Estudiando las momias han podido hacerse las primeras averiguaciones sobre la filogénesis de los pueblos primitivos.

terminará por ofrecer una visión mucho más rica del pasado.

La arqueología molecular, una ciencia joven, corrobora las inferencias hechas a partir de la genética de las poblaciones modernas. Junto con los estudios comparativos de las lenguas y de la cultura material, promete desenredar la variopinta maraña de la historia biológica de la humanidad, sus divisiones y migraciones, extinciones y expansiones. La arqueología molecular ha puesto ya en claro aspectos más bien exteriores: los climas que hubieron de afrontar los pueblos primitivos, las enfermedades que contraían, los alimentos que comían, los modos de criar a su prole. En última instancia, el nuevo campo de estudio capacitará a los biólogos para comprobar la teoría de Darwin siguiéndola paso a paso a lo largo de la historia. "Podemos soñar ya en sorprender con las manos en la masa a la evolución molecular", decía exultante Allan C. Wilson, de la Universidad de California en Berkeley, quien fuera uno de los adelantados en ese nuevo campo.

Nadie sabe hasta dónde nos retrotraerán las indagaciones sobre el ADN, pero hay razones para el optimismo. Una hoja de magnolio todavía verde ha conservado ADN durante más de 17 millones de años, y se conjetura que restos del ADN de los homínidos podrían persistir en el tejido óseo por lo menos hasta que éste se convirtió en su propio facsímil mineralizado. Los más antiguos restos humanos analizados nos remontan unos 8000 años, pero posiblemente esa fecha ya se ha superado.

En los tres años transcurridos desde que los paleontólogos de la Universidad de Oxford recuperaron el primer ADN de viejos huesos, han venido sucediéndose con persistencia rumores de que diversos equipos están buscando esas claves en los restos de arcaicos homínidos. Nadie, empero, se atreve a admitir que esté empleando técnicas de análisis no comprobadas y con las que podrían destrozarse tan inestimables reliquias.

Pero había verdad en los rumores. Erik Trinkaus, paleoantropólogo de la Universidad de Nuevo México, asegura haber proporcionado un trozo de hueso neandertal a los bioquímicos del Laboratorio Nacional de los Alamos, quienes se esfuerzan por recuperar ADN de ese resto. El hueso, fragmento de vértebra de un esqueleto hallado en Shanidar, Irak, data de hace unos 50.000 años. Trinkaus no sabía qué hacer con el espécimen porque su carácter fragmentario ni siquiera le permitía identificar la vértebra a que había pertenecido.

El grupo de Los Alamos guarda silencio sobre su trabajo. Pero fuentes próximas al proyecto dicen que los estudios preliminares demuestran que hay ADN, que parece estar dañado —como por la edad— y que procede de un primate. Las mismas fuentes advertían, con todo, que deberían acometerse pruebas rigurosas para eliminar la posibilidad de que el ADN proviniese de contaminantes modernos y no del hueso. Sólo entonces se decidiría el grupo a hacer públicos los resultados de su investigación. Ello demuestra, antes que cualquier otra cosa, el rápido desarrollo de la arqueología molecular. Hasta ayer mismo, la investigación sobre el pasado genético humano se centraba, no en la piel y los huesos de momias y esqueletos, sino en la sangre de individuos vivos. No se presentaba ninguna buena alternativa para el análisis de rasgos puramente hereditarios.

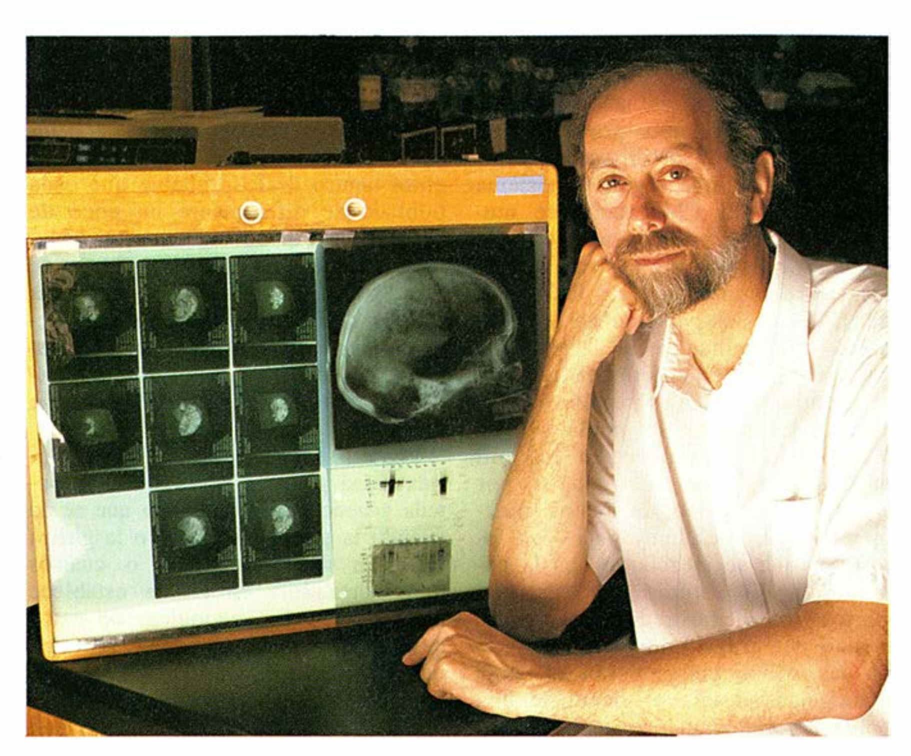
En 1984, Wilson y su equipo de Berkeley lograban la primera identificación de genes en tejidos antiguos. Clonaron ADN a partir de pieles de quagga, mamífero parecido a la cebra que se extinguió el siglo pasado en Africa. En 1985, Svante Pääbo, hoy en la Universidad de Munich, clonó ADN extraído de una momia egipcia de más de 4400 años de antigüedad. En 1988, mientras trabajaba todavía en el laboratorio de Wilson, Pääbo aplicó la reacción en cadena de la polimerasa (RCP) a restos humanos antiguos. Multiplicando ("amplificando") el ADN mitocondrial de un cerebro conservado en Little Salt Spring, retrotrajo 2600 años más el horizonte del pasado.



2. SVANTE PÄÄBO, de la Universidad de Munich, demostró en 1985 la viabilidad de la arqueología molecular clonando ADN de una momia. Aquí posa sosteniendo una muestra del material sobre el que está estudiando la historia genética de Egipto.

Por último, en 1989 Sykes, Erika Hagelberg y Robert E. M. Hedges, de Oxford, multiplicaban ADN procedente de un hueso humano.

Encontrar trazas de ADN en los restos raspados era punto menos que imposible hasta que en 1983 se descubrió la RCP, técnica de extraordinaria sensibilidad para la replicación del ADN. El proceso se desarrolla en dos fases: en la primera, la doble hélice de una muestra del ADN en cuestión se divide en sus dos hebras componentes, y, en la segunda, las enzimas construyen otra nueva hebra a partir de un baño de bases de los ácidos nucleicos que flotan libremente. Por iteración del proceso, una molécula de ADN se convierte en dos, luego en cuatro y así sucesivamente, progresión geométrica que, en principio, puede dar por resultado una gran cantidad del producto para el análisis. Y así, muestras de ADN que hace diez años habrían eludido todo intento de detección dibujan ahora unas bandas electroforéticas suficientemente sólidas: los rastros dejados por materiales de distinto peso molecular tras haber atravesado un sustrato de gel.



3. WILLIAM W. HAUSWIRTH, de la Universidad de Florida en Gainesville, halla una sorprendente homogeneidad genética en el ADN de cerebros prehistóricos encontrados en la Florida central.

Ocurre, sin embargo, que la propia sensibilidad de la RCP la convierte en algo endiabladamente delicado. Aunque se introduzca en el baño una sola célula epidérmica, la RCP multiplicará el ADN ciegamente y, habida cuenta de su mejor estado de conservación, lo hará de forma preferencial o selectiva. A los pocos ciclos de duplicación, no se verán en el tubo de ensayo los secretos del hombre de Neandertal, sino los nuestros propios. La mayor parte del ADN procedente de materiales antiguos está muy degradado y no facilita la obtención de grandes bandas en el gel.

Pääbo ha creado protocolos de laboratorio para evitar, en lo posible, confundir el ADN nuevo con el antiguo. Día a día se van refinando las técnicas de lavado, sin bajar la guardia en otro frente, el de la lucha contra los inhibidores, misteriosas sustancias que dejan fuera de la RCP al viejo ADN. La albúmina sérica bovina suele aflojar a veces el ligamen que ata en forma de nudos el ADN viejo. Y no paran ahí las limitaciones. La paleoantropología molecular no ha conseguido aún determinar el sexo de muestras óseas.

Cerebros encenagados

¿Cómo obtener ADN antiguo? En un comienzo, se extraía de los tejidos blandos conservados por desecación, como los de las momias egipcias. Se excluían, en cambio, los cuerpos que se habían preservado en terrenos de turba, a pesar de su notabilísimo grado de conservación. Los individuos que habitaron zonas pantanosas, como las víctimas rituales de la Edad del Hierro dragadas hace décadas en Dinamarca y un posible druida encontrado hace siete años en la Gran Bretaña, muestran señales de acuchillamiento en el cuello, tatuajes en el cuerpo, restos de comida en el intestino y hasta patas de gallo alrededor de los ojos. Por desgracia, el que estén intactos se debe precisamente a que fueron encurtidos mediante ácido tánico, que degrada al ADN, un ácido a su vez.

El Hombre del Glaciar, deshidratado por el hielo, es una excepción valiosa e insólita. Sus restos no los destruyó el tanino; todo parece indicar que su ADN está bien conservado. Los investigadores se muestran incluso optimistas en cuanto a un posible descubrimiento de bacterias y de otros organismos mórbicos, quizás hasta de esporas viables, en sus tejidos.

En ocasiones, hasta de un cenagal puede brotar la sorpresa. En una turbera de Windover, las apariciones intermitentes de caliza neutralizaron la acción del ácido, lo que preservó la más antigua muestra de ADN humano hoy conocida. Unos obreros que abrían zanjas en la turbera hallaron un estrato de unos 30 centímetros de potencia —resultado de las sedimentaciones de un milenio— que estaba repleto de esqueletos; algunos presentaban intacto el cráneo y, bien conservado aunque encogido, el cerebro. Los más antiguos se dataron en 8000 años, y los menos en 7000.

En la primera mitad del decenio de los ochenta, Glen H. Doran, de la Universidad estatal de Florida, comprometió a los antropólogos en un ambicioso proyecto para excavar el pantano, por secciones separadas mediante diques y de las que se iba sacando el agua con bombas. Hallaron algunos esqueletos sujetados todavía por estacas cruzadas en forma de aspa, para evitar que flotaran y quedasen a la vista de los carroñeros. Tras recoger 177 esqueletos y 91 cerebros, los arqueólogos cerraron la fosa, dejando deliberadamente intactos otros 60 esqueletos. La razón era obvia, razonó William W. Hauswirth, de la Universidad de Florida en Gainesville: el material genético se mantiene muy estable in situ, y puesto que no se sabía bien qué analizar, la prudencia aconsejaba aguardar.

Durante cuatro años, Hauswirth se debatió contra las frustraciones que comporta la clonación al viejo estilo, y, más tarde, contra las imprevistas complicaciones de la recién descubierta RCP. Por fin, hace un año, Hauswirth y Cynthia D. Dickel, también de Gainesville, junto con David A. Lawlor y Peter Parham, de la Universidad

de Stanford, identificaron segmentos significativos del ADN de un hombre de Windover de 7500 años de antigüedad. Los segmentos provenían del "complejo mayor de histocompatibilidad" (CMH), que regula el sistema inmunitario. El CMH contiene muchos sitios que portan uno u otro de un par de genes alternativos, o alelos. La determinación de los alelos del CMH de las poblaciones antiguas habrá de facultar, a la larga, para averiguar a qué enfermedades eran resistentes y a cuáles sensibles.

La genética de la población de Windover cambió poco en los mil años de historia atestiguados por aquel estrato lleno de restos fúnebres; fueron, pues, muy pocos los forasteros que se mezclaron con la comunidad. El estudio de tres loci génicos ha demostrado la homogeneidad del grupo, muy superior a la de las tribus contemporáneas. Esta homogeneidad tal vez denuncie una población endógama. Si constituía un rasgo general —si los americanos primitivos no salían del terruño y se casaban entre vecinos— el aislamiento podría haber originado una multiplicidad de lenguajes, modelo que ahora se encuentra en los valles de las tierras altas de Nueva Guinea. Este supuesto explicaría por qué en el Nuevo Mundo había en 1492 tanta diversidad de lenguas como en el Viejo, así como el que en Nueva Guinea viva aún la quinta parte del total de familias lingüísticas.

Para poner a prueba esa inferencia, puede compararse la diversidad genética entre hombres y mujeres de antiguas necrópolis. Se presume que, en un mismo poblado, varones y hembras nazcan con igual variabilidad. Y entra dentro de lo probable que cada poblado se diferenciara un poco de los demás. Por consiguiente, si accedieron a la comunidad mujeres de otros sitios, se parecerían menos unas a otras que los hombres entre sí. Fenómeno que comprobó Lyle W. Konigsberg, de la Universidad de Tennessee, al buscar indicios de exogamia entre los constructores de túmulos.

Por otro lado, aquella tribu de Florida quizá pasara por un cuello de botella genético, acontecimiento que se da cuando la peste, el hambre o la guerra devastan una comunidad o cuando una avanzadilla emigrante establece una colonia. En cualquiera de estos casos, la nueva población presenta una variabilidad genética menor que la ofrecida por la comunidad originaria, y los genes suelen aparecer en diferentes proporciones. La mezcla genética produce un efecto fundador. Este, combinado con la selección natural o sexual, acaso explique por qué tantos irlandeses son pelirrojos o por qué tienden a ser tan robustos los habitantes de las islas Samoa.

Varios laboratorios emplean ya métodos genéticos en su búsqueda de pruebas del cuello de botella que hubieron de superar los asiáticos inmigrantes en el Nuevo Mundo. Pääbo y expertos de la Universidad de Utah se proponen llevar a cabo una amplia revisión genética de las poblaciones actuales y también de otras tan arcaicas como las momias de 900 años de antigüedad halladas en el Sudoeste de América. "Intentamos reconstruir la historia del poblamiento de toda América, del Norte al Sur", dice Pääbo. "Queremos ver cómo estaban relacionados los pobladores entre sí y, hacia atrás, con Asia, para averiguar si el árbol poblacional se corresponde con las clasificaciones lingüísticas."

Hauswirth, Noreen Tuross, bioquímico del Instituto Smithsoniano, y otros establecerán tres bases de datos sobre ADN antiguo para estudiar los efectos del sarampión y de la viruela, que mataron a la mayoría de los indígenas americanos en unas pocas generaciones después de su primer contacto con los europeos. Los datos proceden de Windover, Indian Knoll (yacimiento éste con 1200 esqueletos bien conservados) y Arroyo Seco. Se incluyó el sitio argentino por su riqueza de material y por su lejanía de los otros dos septentrionales. Se trata del primer análisis genético del contacto preeuropeo con los americanos nativos.

Merced a tales análisis de ADN paleohumano se confirmarán, o se debilitarán, las teorías sobre el hombre primitivo, que se basan en comparaciones genéticas con las poblaciones modernas. Cuando Luigi Luca Cavalli-Sforza, de Stanford, y sus colegas trazaron en forma de árboles genealógicos las grandes corrientes de dispersión genética de las poblaciones, resultó que aquellos árboles coincidían bastante bien con una clasificación genética de las lenguas.



4. BRYAN SYKES y sus colegas de la Universidad de Oxford han dilatado el horizonte de la inquisición paleogenética al recuperar ADN de secas osamentas.

No importa quién fuera el padre

Sí es de primordial interés que el estudio del ADN paleohumano ponga a prueba la teoría de Wilson según la cual todos los hombres modernos descenderían de una mujer, Eva la llaman, que habría vivido en Africa. Wilson, Cann y Mark Stoneking analizaron ADN procedente de mitocondrias, orgánulos que convierten la glucosa en una forma más manejable de energía. A diferencia del ADN nuclear, el de las mitocondrias pasa sólo de la madre al hijo. (Aunque algunos estudios con ratones han demostrado que el ADN mitocondrial paterno podría infiltrarse en la generación siguiente, pero sin recombinarse con el materno.) La irrelevancia del padre da fijación a los linajes y deja que la variación genealógica sea fruto exclusivo de la mutación.

Wilson y su equipo compararon ADN mitocondrial de individuos de distintas partes del mundo para estimar las

distancias genéticas. Representaron éstas en un árbol genealógico cuyas raíces las establecieron por comparación con los datos procedentes de un chimpancé. Como las ramas más largas estaban en Africa —lo que parecía indicar que el ADN había empezado a diferenciarse allí—, situaron a Eva en aquel continente. Aunque nadie discute la muy notoria diversidad de los genes africanos, algunos especialistas han encontrado recientemente ciertos defectos en la confección del árbol. Han hecho ver que con otros tratamientos estadísticos se podían diseñar árboles tan plausibles y cuyas raíces fueran asiáticas.

Se debate con mayor acritud la hipótesis del reloj molecular esgrimida por los wilsonianos e inferida de las diferencias genéticas acumuladas por los humanos y los chimpancés durante los aproximadamente cinco millones de años de vidas separadas. El ADN mitocondrial induce de suyo a tal cronometría, porque su rápido ritmo de mutación lo convierte en un indicador muy sensible del tiempo. El reloj dató a Eva en alrededor de 200.000 años, llevando al equipo a concluir que los descendientes de ella —los primeros humanos modernos— se dispersaron después fuera de Africa reemplazando a otros homínidos sin cruzarse apenas con los sustituidos.

La teoría "africanista" había sido formulada independientemente, basándose en datos de estricta paleontología, por Christopher B. Stringer, del Museo de Historia Natural de Londres. Otros expertos, sin embargo, confieren una interpretación distinta a los mismos fósiles.

Los genéticos moleculares esperan dirimir la cuestión analizando ADN que nos ha llegado en los huesos antiguos. Las bases de datos genéticos, tales como las propuestas por Hauswirth, podrían calibrar en términos absolutos el reloj mitocondrial. Los investigadores tendrían que hallar modernos descendientes del ADN antiguo, contar las sustituciones de pares de bases y compararlas con los datos de análisis de radiocarbono de los huesos en que se encontró el ADN.

Como punto de partida, Pääbo y Anna Di Rienzo, adscrita también al laboratorio de Berkeley, estudiarán a la vez momias e individuos modernos procedentes de las riberas del Nilo, con miras a encontrar indicios de emigración del sur al norte a través del río. (Se obtendría una prueba más concluyente de una sola muestra de ADN neandertalense. Si portara marcadores como los hallados en sólo escasas ramas del árbol genealógico de Eva, quedaría refutada la hipótesis de la sustitución total.)



5. NOREEN TUROSS, del Instituto Smithsoniano de Washington, congela huesos y los reduce a polvo en su búsqueda de anticuerpos antiguos.

Otros arqueólogos moleculares vuelven a los restos antiguos para rastrear los efectos de las enfermedades en las poblaciones. Tuross, del Smithsoniano, busca pruebas moleculares directas de casos precolombinos de treponematosis: infecciones causadas por las espiroquetas o bacterias helicoidales, que provocan sífilis de varia etiología, sífilis endémica, tabardillo y tifus exantemático. (Pero advierte que sus pruebas no pueden, en principio, distinguir entre una y otra cepa treponémica.)

En vez de andar hurgando en el ADN, Tuross busca los anticuerpos que quizás hayan penetrado en los huesos de individuos infectados. Ha identificado inmunoglobulinas de la clase IgG en los esqueletos de dos poblaciones del Nuevo Mundo: la de Windover y otra de un yacimiento del siglo XVI situado al norte de las Grandes Llanuras. Un estudio molecular comparativo de infecciones treponémicas en el Viejo y el Nuevo Mundo podría resolver por fin la cuestión de si la sífilis fue traída de América a Europa por los españoles.

Tom D. Dillehay, de la Universidad de Kentucky, se afana en acotar los cuellos de botella mórbicos a los que debieron de enfrentarse los primeros americanos nada más llegar a este hemisferio. Cree él que el paso por el frío en su avance hacia el sur, a través del Canadá, podría haber limpiado de algunos parásitos del Viejo Mundo a los inmigrantes. Pero seguramente les estarían acechando otros nuevos, sobre todo en los húmedos climas de México y de Centroamérica.

Entre los cuellos de botella producidos por agentes infecciosos que revisten mayor interés están los que priman la selección de enfermedades genéticas. Las talasemias, trastornos de la sangre, aparecieron, vía mutaciones independientes, en Asia y en el Pacífico. Yacimientos prehistóricos de Tailandia acaban de proporcionar a los historiadores de la talasemia una prueba de oro: huesos de hace 4000 años con señales de la enfermedad.

Al apuntalar en el tiempo procesos evolutivos, esos hallazgos contribuyen a refinar los modelos ideados para discernir si otros genes surgieron por azar o por selección. Hasta la incapacidad de muchos adultos para digerir la lactosa, el azúcar que hay en la leche fresca, ha sido explicada así.

La lactasa, enzima que digiere la lactosa, se mantiene entre los adultos de grupos étnicos descendientes de sociedades ganaderas. Falta, sin embargo, entre adultos de pueblos cazadores-recolectores. La excepción de esa regla la aportan los forrajeadores que hablan el idioma san (bosquímanos), del desierto del Kalahari; alrededor del 10 por ciento de los adultos digieren la lactosa. Por consiguiente, se concluye, los bebedores de leche fresca que hablan san no pueden haber sido nunca genuinos cazadores-recolectores.

¿Qué explicación merece ese dato? Los forrajeadores se separarían de sus vecinos los hotentotes, renunciando a la vida de pastoreo que éstos han seguido llevando hasta hoy. No todos están de acuerdo con ese razonamiento, y hay quien pone el contraejemplo de los daneses, cuyo porcentaje de mala absorción de la lactosa es uno de los más bajos del mundo; quizás, se dice, atravesaron por alguna situación dietética tan agobiante como para que el tomar o no tomar grandes cantidades de leche fresca influyese decisivamente en su supervivencia.

Un mensajero de la Edad de Piedra

Cuando las policías de ambos lados de la frontera entre Austria e Italia tuvieron la primera noticia de que se había encontrado un cadáver en un glaciar de los Alpes, reaccionaron con cierta indiferencia. Después de todo, los glaciares sacan periódicamente sus muertos a la superficie; sólo en 1991, los calores del estío deshelaron una docena de cuerpos.

No pensó igual una pareja de montañeros. Deciden investigar por su cuenta y vuelven trayendo sorprendentes nuevas: el cadáver, que está medio flotando en una poza de reciente formación, tiene grabadas en la espalda cuatro rayas paralelas de color azulenco oscuro. Junto a él hay extraños utensilios, entre los que se incluyen un zapato y una especie de arco desencordado. Rainer Henn, del Instituto de Medicina Forense de Innsbruck, reconoció nada más subir allá que el cuerpo en cuestión era una momia antigua y lo envolvió en hielo para trasladarlo en helicóptero a su laboratorio.

Austriacos son los directores de los dos equipos internacionales que se han repartido el estudio del Hombre del Glaciar y de sus efectos. Werner Platzer, anatomista de la Universidad de Innsbruck, dirige el equipo que analiza el cadáver mismo. Konrad Spindler, arqueólogo de Innsbruck, está al frente del grupo que estudia las marcas de la piel y los enseres hallados junto al muerto.

El Hombre del Glaciar se conservó con el cuello adornado aún con un amuleto, un lazo del que pendía un colgante de mármol blanco. Las marcas en la piel podrían ser los más antiguos tatuajes que se conocen. Los siguientes en antigüedad son sólo de hace unos 2000 años. Pueden significar cualquier cosa, explica Spindler: pertenencia a una determinada familia, tribu, poblado o clase social.

Respecto a esto último, al menos, hay indicios de que al Hombre del Glaciar le iban bastante bien las cosas: llevaba atuendos de cuero bien entallados y rellenos de paja para defenderse del frío aire de los montes, y poseía un hacha de metal, objeto también costoso. Los expertos pensaron al principio que el hacha era de bronce y que, por tanto, la antigüedad del Hombre del Glaciar sería de unos 4000 años. Pero después los análisis pusieron de manifiesto que era de cobre, metal más blando característico de finales del Neolítico.

Esta conjetura cronológica fue confirmada mediante la datación del atuendo con el radiocarbono, que dio para el Hombre del Glaciar una antigüedad de unos 5000 años. Finalmente, en febrero, la datación de la piel y de los huesos echó algunos siglos más hacia atrás su antigüedad. Se espera, además, que el Hombre del Glaciar







6. MEDIO FLOTANDO en un sepulcro de hielo, el Hombre del Glaciar aparece aquí como días antes lo vieran sus descubridores: con sólo la mitad superior del cuerpo fuera del agua helada. Los biólogos escrutaron el cadáver en busca de hongos (*arriba, izquierda*); luego lo guardaron en condiciones similares a las que lo conservaran durante más de

La leche es, por descontado, la bebida de los bebés, y es precisamente el cuándo se destetaba a los infantes lo que podría tener sorprendentes consecuencias. En las culturas de forrajeo modernas, la madre da el pecho a sus hijos durante varios años, y en ese tiempo la lactación les suprime la fertilidad. Pero Jane E. Buikstra, de la Universidad de Chicago, ha sugerido que los primeros granjeros podrían haber acelerado las cosas supliendo la leche materna con papillas de cereales. Tan antiguo pábulo permitiría a las madres dejar de amamantar a sus crías y empezar más pronto a procrear nuevos vástagos, capacitando a los agricultores para cruzar sus estirpes con las de los forrajeadores que vivían en torno a ellos.

Después, en unos cuantos milenios, las culturas agrícolas habrían acabado con las del forrajeo por la fuerza de los números, arando sus terrenos de caza y remplazando sus lenguas con los dialectos propios, en rápidos procesos de diferenciación. De este modo, se diseminarían por vastísimos territorios los gérmenes de las familias lingüísticas indoeuropea, chino-tibetana, austronesia y afroasiática. Son adalides de esta teoría, respecto al indoeuropeo, Colin Renfrew, de la Universidad de Cambridge, y, respecto al austronesio, Peter Bellwood, de la Universidad Nacional de Australia.

¿Por qué explicar así la difusión de los agricultores? Porque otros ar-

conserve también organismos parásitos cuyo ADN se pueda todavía secuenciar, y quién sabe si también esporas latentes capaces de volver a una vida activa.

Por ahora, lo único que se sabe de fijo es que, lo mismo que nueve de cada diez personas del mundo entero, tenía los ojos y el cabello oscuros. (Este último, que se le desprendió después de la muerte, medía unos nueve centímetros de longitud, lo suficiente como para que le cayera por delante hasta los ojos.)

Los investigadores están abordando con rigor posibles hipótesis para resolver los enigmas planteados por este hallazgo:

■ **¿Qué estaba haciendo el hombre en las montañas?** Puede que estuviera cazando con su arco y su aljaba, pues dentro de ésta había unas cuantas flechas dispuestas para disparar. O tal vez anduviese buscando cobre. Acaso pastoreara ovejas y cabras y las hiciese bajar hacia el valle sacándolas ya de los altos prados alpinos en que habían pastado durante el estío. "Sabemos que murió a finales del verano", dice Spindler, "porque tenía consigo un tipo de ciruelitas que maduran en septiembre".

■ **¿Cómo murió?** No había sufrido magulladuras ni cortes, y sus huesos y órganos, escudriñados y analizados por tomografía computerizada, no presentan vestigios de ninguna anomalía. Su dentadura está desgastada, pero esto se debe a la dieta de aquella remota edad: con el pan había que mascar arenillas abrasivas, inevitable efecto del realizar la molienda de los granos con toscos pedruscos. Tendría, al morir, entre 20 y 30 años.

En fin, el Hombre del Glaciar dejó tras sí unas buenas provisiones, inclusive un poco de carne. No murió, pues, de inanición. Debió de morir de frío, durante la noche. Es muy peligroso en estas montañas, a tanta altitud. Si uno se siente cansado y se dispone a dormir, el frío puede matarlo en pocas horas.

■ **¿Cómo pudo conservarse su cuerpo?** Un aguacero repentino le habría forzado a guarecerse en la depresión rocosa donde fue hallado su cadáver. El frío que le mató mantuvo incorruptas sus carnes, mientras el sol y el viento las fueron resecando. A continuación una oportuna nevada hurtaría el cadáver a las aves carroñeras, que sólo le dieron unos cuantos picotazos. Por último, se irían apilando encima metros de nieve y hielo, pero sin que su peso fuese suficiente para romper los endurecidos despojos. Permaneció donde estaba porque le protegían el hoyo rocoso y la nieve circundante del glaciar que le fue tapando lentamente.

Los arqueólogos excavarán el área cuando terminen de derretirse las nieves del invierno, pero nadie espera encontrar a los compañeros del muerto, si es que éste los tuvo. Nuestro Hombre del Glaciar podría hacer suyas aquellas palabras del siervo de Job: "Y solamente he escapado yo para contártelo".







cinco milenios. El desgaste de los dientes (*izquierda, abajo*) se debe a una dieta arenosa. Se desconoce el motivo de los tatuajes de la espalda (*arriba, derecha*). Como el ropaje del individuo y sus útiles (*derecha, abajo*) han llegado hasta nosotros sin pasar por el tamiz de los ritos funerarios, nos ofrecen una visión unica de objetos de la vida diaria.

gumentos no parecen ya sólidos. Para Jared Diamond, de la Universidad de California en Los Angeles, y muchos con él, la agricultura habría constituido el error más grave de la historia de la raza humana. Considera la agricultura un mero recurso expeditivo, que se adoptó para suplir la mejor alimentación que la caza no podía ya procurar, tal vez porque en las llanuras empezaron a ir en mengua las manadas. A la expansión de las gentes le sustituyó su vinculación a la tierra. Diamond cita profusión de datos que evidencian que las dietas derivadas del monocultivo de los primeros agricultores, así como sus formas de vivir apiñados, les desmedraron y enflaquecieron los cuerpos, aumentaron los huecos en sus dentaduras y les acortaron las vidas en comparación con las de sus contemporáneos los forrajeadores. (Diamond opina que cuando la agricultura se introdujo en lo que ahora son Grecia y Turquía, hace unos 6000 años, la estatura de los varones se acortó en 177 milímetros, adquiriendo una talla media de 1,53 metros; las mujeres perderían 127 milímetros quedándose en torno a 1,50 metros.)

Los modelos o tipos del destete podrían constituir, pues, una fuente donde documentar el paso del forrajeo a la agricultura. La cuestión está en dar con unos marcadores químicos que permitan distinguir a los infantes que maman de los que han sido destetados. Tuross y Marilyn L.

Valor informativo de los genes neandertales

En los nueve años transcurridos desde que los bioquímicos empezaron a multiplicar trazas de ADN, el horizonte de la arqueología molecular ha ido reculando en el tiempo. Hay en curso de realización muchos proyectos de estudio de materiales de la prehistoria reciente; otros esfuerzos no tan divulgados parece ser que en unos meses lograrán sus primeros éxitos y desenredarán los genomas de los homínidos arcaicos. El disponer de ADN antiguo, posiblemente hasta de los neandertales, habrá de permitir a los antropólogos someter a prueba algunas teorías sobre los orígenes de la humanidad.

La más destacada quizá de tales teorías se vale de procedimientos genealógicos para determinar dónde y cuándo surgieron seres humanos semejantes a los de hoy. Un árbol genealógico que fue propuesto en 1987 por un grupo dirigido por Allan C. Wilson rastrea el ADN mitocondrial a lo largo de su línea materna de descendencia hasta llegar al único antepasado común de todos los hombres que hoy viven.

Como las ramas más gruesas del árbol separaban a los africanos de los no africanos, y como la diversidad genética era mayor en Africa, el grupo de Wilson situó a Eva —que así se la llama— en Africa. Después, usando como índice cronológico la comparación entre chimpancé y hombre, el equipo asignó a Eva una antigüedad entre los 150.000 y los 200.000 años, datándola por tanto como muy posterior a la época en que los homínidos arcaicos estaban ya establecidos en la mayor parte del Viejo Mundo. Los resultados sugerían que los primeros hombres modernos, procedentes de Africa, habían remplazado a otros homínidos sin cruzarse con ellos.

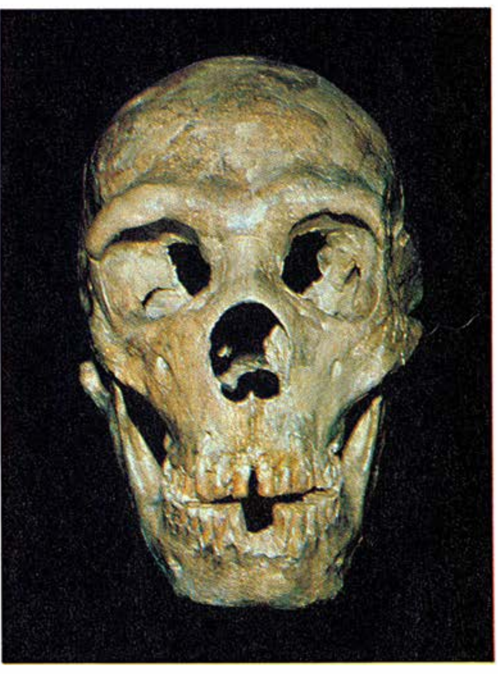
Muchas voces se levantaron contra la hipótesis. Pero la crítica más seria ha venido de la propia genética. Al grupo de Wilson, oponen, se le pasó por alto que el programa de ordenador que emplearon para construir su árbol produce millares, tal vez hasta millones de árboles no menos convincentes, muchos de los cuales tendrían sus raíces en Asia.

Mark Stoneking, miembro del grupo de Wilson que actualmente enseña en la Universidad estatal de Pennsylvania, dice que la mayor diversidad genética de los africanos sigue respaldando la hipótesis de Eva. Pero admite que los nuevos argumentos estadísticos dejan bastante coja la argumentación original. Y sugiere seleccionar los datos que ofrecen indicios de un repentino crecimiento demográfico, tan fuerte como para que le hubiese seguido una gran expansión fuera de Africa.

Cabría también que se hallaran genes que controlan la variación morfológica, sigue razonando Stoneking, variación como la de los rasgos físicos que diferencian a las subpoblaciones o a las razas humanas de hoy día; luego, se podrían comparar esos genes del ADN antiguo con los del ADN moderno. Si tales genes llegan a encontrarse —y si ellos prueban que los homínidos arcaicos de Europa, Asia y Africa no se parecían en nada a los modernos habitantes de las respectivas zonas— se corroboraría la teoría de los orígenes africanos recientes.

El más humilde éxito en la recuperación de genes de los neandertales y de otros homínidos arcaicos redundaría en provecho del propio proyecto, pues induciría a los paleontólogos a poner mayor cantidad de huesos a disposición de los bioquímicos. Con lo cual, toda una avalancha de datos paleogenéticos permitiría en seguida a los investigadores trazar árboles genealógicos mucho más precisos que los que pueden trazarse a partir del ADN de los hombres actuales.

Por otra parte, la información sería entonces muy superior a la que proporciona la más fina de las genealogías, puesto que sugeriría no sólo lo que ocurrió, sino por qué. Y podría también sopesarse la importancia que tuviera el ciego azar en la supervivencia o la extinción de las estirpes.



7. NEANDERTAL procedente de Shanidar, Irak, datado en unos 50.000 años de antigüedad. Un trozo de hueso de un esqueleto que había cerca de esta calavera ha sido entregado a los bioquímicos, que ahora tratan de recuperar ADN a partir de él.

Fogel, de la Institución Carnegie de Washington, han ideado una técnica para examinar, no la matriz mineral del hueso, sino las fibras de colágeno que se interfieren en ella como las pajas en el adobe. El colágeno, como todas las proteínas sintetizadas por animales, concentra ^{15}N, el isótopo más pesado del nitrógeno. Los animales que devoran a otros animales concentran aún más el isótopo.

Los investigadores examinaron dos muestras arqueológicas: una procedente de un yacimiento preagrícola de Tennessee datada entre los 6000 y los 5000 años de antigüedad; la otra, de un yacimiento del sur de Dakota en el que hubo maíz desde el año 1650 hasta el 1733 d.C. Un antropólogo calculó la edad de los cuerpos infantiles procedentes de cada yacimiento por el desarrollo de sus dentaduras. Tuross disolvió las costillas, dejando el colágeno en forma de un sedimento gelatinoso.

Según este análisis, la introducción del cultivo del maíz en las Grandes Llanuras no influyó en los tiempos del destete. El análisis isotópico del colágeno echó de ver que la concentración de nitrógeno pesado era máxima a la edad de 1,1 años tanto entre los forrajeadores como entre los campesinos, antes de descender hasta los niveles de los adultos durante los dos años de vida subsiguientes. A continuación, pasaron a examinar los especímenes procedentes de los principales centros de la innovación agrícola —Sudamérica, el Creciente Fértil, China y Nueva Guinea. Si alguna de estas zonas suministra pruebas de que las edades del destete se fueron acortando con la aparición de la agricultura, la hipótesis de Buikstra habrá quedado confirmada.

La Polinesia se ha convertido en otro foco de atracción para los genéticos, en parte porque sus lenguas — retoños todas ellas de la familia austronesia— reflejan con sobresaliente detalle las migraciones prehistóricas, lo que facilita la búsqueda de marcadores genéticos. Además, los genes polinésicos, en particular los incluidos en el ADN mitocondrial, heredados por vía materna, no enmarañan el cuadro con inmigrantes europeos y chinos, que eran exclusivamente varones. El ADN mitocondrial antiguo se ajusta al de un linaje actual derivado de los dos grupos principales que Cann ha hallado en la Polinesia. Similares parentescos profundos los han encontrado Sykes entre isleños de Cook, y Stoneking entre los habitantes de los altiplanos de Nueva Guinea.

Los genes de los polinesios varían menos que los de otros pueblos del Pacífico, lo que parece indicar que sus antepasados hubieron de superar recientemente un cuello de botella genético. Y pudo ocurrir si el establecimiento se fundó con un solo desembarco o con unos pocos, según se deduce, entre otros datos, de la supresión de nueve pares de bases en el ADN mitocondrial, mutación esta que se originó en Asia y que se ve, en algún grado, en la mayoría de las poblaciones procedentes de allá. La deleción se presenta, sobre todo, en las costas de Nueva Guinea y, más que en ningún otro sitio, en la Polinesia.

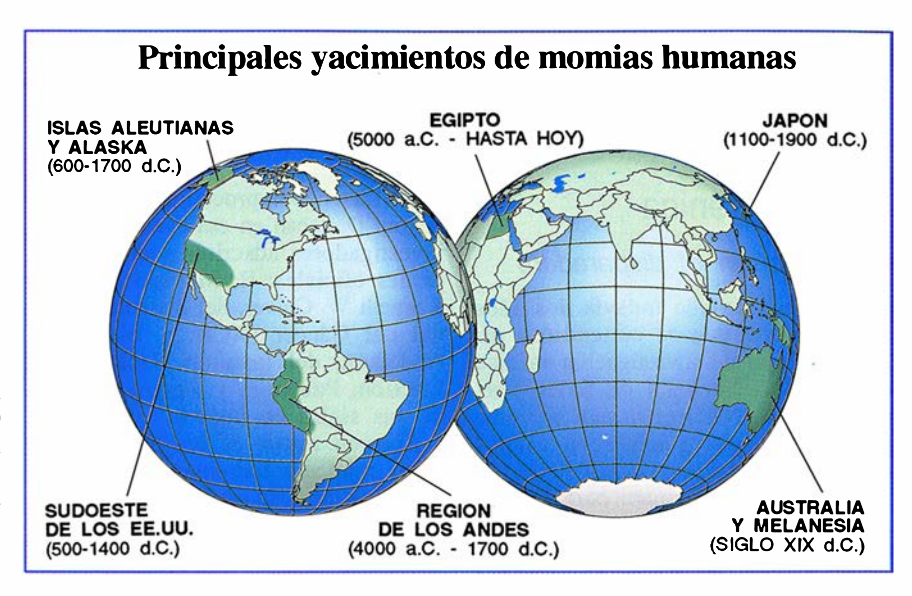
De tal evidencia infieren los genéticos que los emigrantes salidos de las islas del sudeste asiático cambiaron de parejas en las costas de Nueva Guinea y que algunas de sus mujeres continuaron entonces el viaje adentrándose en la Polinesia. Cann quiere comprobar directamente la teoría secuenciando ADN procedente de restos de esqueletos recogidos por toda la zona. Al menos en Polinesia tales restos se han conservado gracias a la práctica de enterrar al difunto en arena seca o entre las frías y secas tobas de lava de las islas volcánicas.

Hablar en nombre de los muertos

Pero, ¿pertenecen los restos al científico que los encuentra, o a los descendientes vivos de aquel o aquellos difuntos? En las partes de la Polinesia en que abundan los materiales más idóneos para la arqueología molecular, no es fácil el acceso a ellos por la oposición de los nativos. Parecidas dificultades afligen a los arqueólogos de Australia, que han visto cómo los esqueletos encontrados en Kow Swamp eran devueltos a la madre tierra, no obstante tratarse de los restos humanos más antiguo del continente.

Aseguran los científicos que no les guía otro propósito que el propio de los activistas defensores de los derechos de los nativos: una imagen del hombre primitivo y de sus logros. Añaden a esto los beneficios sanitarios que reportará su estudio de los orígenes de las predisposiciones genéticas a las enfermedades. Sin embargo, para muchos nativos los beneficios de la ciencia pierden mucho de su atractivo si se los compara con el a veces macabro historial de los colonizadores. Cuando en 1869 murió el último hombre tasmanio, equipos de médicos rivales se pelearon por hacerse con trozos de su cuerpo. Y médico hubo que se fabricó una tabaquera con parte de la piel. Estas degradantes fechorías horrorizaron hasta tal punto a la última mujer tasmania que pidió que se la sepultase en el mar. Su deseo fue burlado y su esqueleto estuvo expuesto hasta 1947. Sólo a los muchos años de su muerte fue, por fin, quemado y las cenizas fueron dispersadas en el océano.

Para honrar a los muertos debemos enterarnos de quiénes fueron y de dónde vinieron. Estos interrogantes fueron los que espolearon el desarrollo de la ciencia moderna. Los eruditos del Renacimiento fueron los primeros en aplicar la razón y la experiencia a la restauración de textos originales, recuperándolos a partir de corruptas copias. A continuación, los filólogos fueron más allá y reconstruyeron lenguas extintas basándose en los datos que las de ellas nacidas les proporcionaban. Estos métodos genealógicos, a la vez científicos e históricos, florecerían al máximo en la biología evolutiva, cuyo más joven vástago —la genética molecular— viene ahora a ponerse al servicio de los historiadores.



Ciencia y empresa

Terapia génica

Empresas en el disparadero

No han pasado todavía dos años desde que se concedió a un grupo de investigación médica del Instituto Nacional de Salud norteamericano (NIH) el primer permiso para tratar a un paciente con células cuyo genoma habíase manipulado. Se insertó un gen funcional para la adenosín-desaminasa (ADA) en leucocitos extraídos de una muchacha cuyo organismo no producía la cantidad suficiente de esa enzima esencial. Las células así restauradas se devolvieron al torrente circulatorio.

El experimento, verdadero hito en la terapia génica, resultó un éxito. Las células transformadas produjeron suficiente ADA para aliviar la grave inmunodeficiencia de la chica; cumplieron esa función incluso mejor que las inyecciones diarias de la enzima. Otras dos muchachas deficientes en ADA reciben ya por transfusión bimensual o trimensual leucocitos propios, tras haber procedido a su reparación. Destacan en esa avanzadilla tres investigadores adscritos a dos instituciones oficiales: R. Michael Blaese y Kenneth W. Culver, del Instituto Nacional del Cáncer (NCI), y W. French Anderson, del Instituto Nacional del Corazón, Pulmones y Sangre (NHLBI, de sus siglas en inglés).

El buen estado de los pacientes de ADA sujetos a tratamiento ha abierto la puerta para la aprobación de nuevos ensayos. El comité norteamericano ha dado luz verde a 17 pruebas clínicas. Lo mismo que el experimento inicial, algunas pruebas repondrán los genes cuya ausencia produce una enfermedad, la fibrosis quística, por ejemplo. Otras tienen como objetivo dotar de nueva capacidad terapéutica a determinados tipos celulares, con la mirada puesta en el tratamiento del SIDA y tumores. Y hay pruebas que conciernen al curso seguido por los marcadores insertados, al objeto de ahondar en los procesos fundamentales de la biología.

Atraídas por el potencial de la terapia de genes, las compañías del sector se afanan en la comercialización del proceso. En esa lid han entrado incluso los grandes laboratorios farmacéuticos, como Sandoz y Merck & Company, si bien prefieren empezar con firmas más pequeñas. En un comienzo se busca desarrollar mejores materiales habituales para los clínicos, en particular vectores para insertar material genético en determinadas células. La empresa norteamericana GTI ha suministrado vectores para la mayoría de las pruebas de terapia de genes iniciadas hasta ahora.



PARA PODER MANIPULAR el genoma humano se hace imperiosa su cartografía, que parece más viable desde la secuenciación de un cromosoma entero de levadura.

De momento, sólo los científicos adscritos a instituciones académicas pueden encabezar la dirección de los protocolos experimentales sometidos a la aprobación oficial. Pero muchos investigadores trabajan en colaboración con empresas de biotecnología. A modo de ejemplo, Targeted Genetics y el Centro de Investigación del Cáncer Fred Hutchinson han obtenido luz verde para una prueba sobre el tratamiento del SIDA. La compañía proporcionará a los clínicos un vector destinado a reforzar la aptitud de ciertas células *T* para reconocer el virus del SIDA. Se administrarán las células reforzadas a los pacientes inscritos en listas de espera para recibir trasplante de médula ósea.

En la mayoría de los ensayos se han empleado, por vectores, retrovirus modificados que introducen su propio ADN en los genomas de las células invadidas. Después de reducir los virus a su mínima expresión, se agrega el gen humano y las secuencias reguladoras (promotores y reforzantes). Los retrovirus preparados muestran una eficacia mayor que los métodos físicos y químicos a la hora de transportar el material genético hasta el interior de las células. No obstante el buen comportamiento de los vectores en los ensayos, persiste el temor de que pudieran volverse contra el organismo e infectarle o estimular un virus latente o un cáncer.

Para seguir el rastro de las células que se introducen en los organismos de los pacientes y controlar su desenvolvimiento, Targeted Genetics inserta un "gen suicida" en sus vectores, el gen de la timidín-quinasa, que es el blanco de fármacos antiherpes tales como el ganciclovir. Si hay que detener la célula manipulada, el fármaco la matará.

Se investiga también con otros

vectores víricos, atraídos por tipos específicos de tejidos. Ronald G. Crystal, de la rama pulmonar del NHLBI, espera modificar un virus, causante de constipados, que se encuentra en el aire: pretende administrar genes a los pacientes mediante un aerosol. Este adenovirus portará el gen de una proteína de la membrana de la célula, que falta en los individuos con fibrosis quística. La proteína ayuda a las células a deshacer el mucus en los pulmones. Se admite, sin embargo, que el organismo puede tornarse inmune al virus aerotransportado y con el tiempo hacer ineficaz la terapia.

Prosigue la investigación, asimismo, en virus que se encaminan hacia zonas específicas del organismo: verbigracia, el herpes que ataca los nervios. La aptitud del herpesvirus para permanecer latente en el genoma hasta que es activado, por la luz ultravioleta u otros medios, podría emplearse ventajosamente algún día.

Otras empresas prefieren dejar de lado los vectores víricos. A pesar de la incapacidad manifiesta de las células para captar material genético pelado, alguna compañía confiesa haber obtenido sorprendentes resultados con la inyección directa de ADN en el tejido muscular. Y hay quien sustituye virus por glicoproteínas, aprovechando su ligamen estrecho con los receptores en el hígado.

Una vez decidido el vector, cada empresa muestra sus peculiares preferencias sobre el tipo de célula a transformar. Las que se decantan por los linfocitos resaltan la extrema facilidad con que se extrae y vuelve a reintroducirse. Se valoran también, y con esos criterios se elegirá, la situación, la longevidad y la movilidad de las células.

Pero no siempre es necesario emparejar genes con células propias si sólo se necesitan éstas para sintetizar un producto. Los fibroblastos, por ejemplo, constituyen un recurso excelente en terapia génica. Por ser células de tejido conjuntivo que se adhieren entre sí, se sueña con implantes subcutáneos que fabriquen el factor de coagulación para controlar la hemofilia o la hormona del crecimiento para tratar la baja estatura, entre otras proteínas. Los implantes podrían extirparse en caso de complicación.

Lo deseable, a la larga, es que la terapia génica avanzara y no se limitara a la infusión periódica de células preparadas, sino que se alcanzara el pleno restablecimiento. Alterar un genoma humano de manera que los cambios se transmitan a sus descendientes está fuera de los límites éticos, pero se podrían conseguir reparaciones duraderas transformando las células precursoras de la médula ósea (las células madre) que dan origen a todos los tipos celulares del sistema inmunitario y tejido sanguíneo. Se ha dado un paso en esa dirección con la modificación experimental de células precursoras de niños sujetos a terapia génica por la deficiencia de ADA.

Aunque GTI proporciona los vectores para los experimentos de ADA y otros, los beneficios económicos de la terapia génica están todavía muy lejos. Muchas de las enfermedades con que se trabaja en estos ensayos pioneros se caracterizan por su extrema rareza. (No llegan a 30 los norteamericanos afectados de deficiencia de ADA.) Pero sí se percibe su futuro. James M. Wilson, de la Universidad de Michigan, por ejemplo, se propone tratar la hipercolesterolemia grave, enfermedad sanguínea hereditaria que hace al organismo incapaz de metabolizar las grasas de la ingesta. Sus pacientes tienen tasas de colesterol de hasta 1000 miligramos por decilitro.

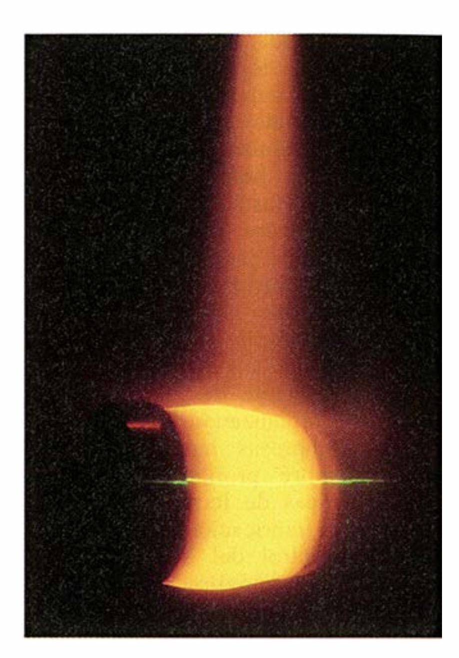
Wilson transferirá a células hepáticas el gen del receptor de LDL, molécula compleja que acepta lipoproteínas de baja densidad en el hígado para su destrucción. Sólo una persona en un millón sufre la enfermedad familiar, pero casi uno en 500 norteamericanos tiene un defecto génico menos serio que da por resultado altos niveles de colesterol y promueve cardiopatías.

Como en otras áreas de la biotecnología, es probable que las empresas dedicadas a la terapia génica tengan que acudir a los tribunales para dirimir derechos de propiedad de determinadas secuencias. Algunas esperan que el Proyecto Genoma Humano suministre listas de genes para curar las enfermedades; otras están desarrollando métodos propios de búsqueda de genes o instituyendo agresivos programas de uso de licencias para procesar los frutos de la investigación académica. El ritmo de progreso parece asegurar que, si el lector no nació con los genes apropiados, tal vez podrá adquirirlos.

Nuevos materiales

El secreto de la cocción

Los expertos continúan con su cantinela de que llegará el momento en que cualquier laborante podrá producir un nuevo supermaterial con sólo ajustar los mandos de resistencia, elasticidad y otras propiedades. Pero mientras ese día llega, tendrán que resolver el problema de cómo fabricarlos sin derrochar la mitad de cada hornada de un producto que vale, por kilo, más de un millón de pesetas.



RECURSO al procesado inteligente para pulverizar una superaleación de níquel.

Precios como ése asustan al mismo Pentágono. La mejora resulta, pues, apremiante. A mediados de los años ochenta, el Departamento de Defensa temía el peligro de que los materiales compuestos ("composites") de matriz metálica y otros materiales exóticos, imprescindibles para los nuevos prototipos aeronáuticos y submarinos, quedaran atascados para siempre en un remoto torno de algún laboratorio. Con el fin de obtener calidad uniforme y forzar la caída en picado de los precios, la Oficina de Proyectos Avanzados para la Defensa lanzó el PIM (programa de procesado inteligente de materiales).

La idea motriz del PIM consistía en crear una nueva generación de sensores y controles por ordenador que realicen cambios instantáneos en las condiciones del procesado. En vez de limitarse a las lecturas habituales de temperatura y presión en uno o varios puntos, se introducirían mediciones más complejas, tales como la aspereza superficial de una pieza fundida. Esta información se cotejaría con un modelo físico —o con un sistema experto informatizado—; si el proceso no avanzara de acuerdo con lo esperado, el control debería ajustar diversas variables: desde la presión del gas hasta el

caudal de salida del metal a través de una tobera de pulverización.

El reclamo del PIM atrajo rápidamente al mundo empresarial, y no sólo a las suministradoras de accesorios para los bombarderos Stealth ("Furtivos"). Hasta la tradicional industria del acero pugna ahora por participar en el juego. Por el sector oficial, se ha distinguido en ese empeño el Instituto Nacional de Patrones y Tecnología (NIST), que en 1991 estableció una Oficina de Procesado Inteligente de Materiales. El NIST está organizando cinco consorcios de empresas industriales para trabajar sobre problemas que van desde técnicas de lectura de magnitudes en la fabricación de polímeros hasta el control del acabado de la pintura de automóviles.

La idea ha comenzado a rodar. La empresa General Electric (GE) desarrolla, dentro del programa, un sistema para fabricar compuestos de matriz metálica para motores a reacción. Estos materiales estructurales, difíciles de fabricar, ofrecen a los proyectistas los beneficios de menor peso y temperaturas de funcionamiento más altas. Usando modelado propio de la dinámica de fluidos, la GE simula el proceso mediante el cual las partículas de titanio, calentadas en un plasma de helio y otros gases, se depositan sobre fibras de zafiro, o un material parecido.

La GE espera convertir esas complejas simulaciones en modelos reducidos que funcionen con la velocidad imprimida en el procesado del material. La simulación informática podría predecir, a partir del caudal de polvo de titanio, cuál será la aspereza superficial o la porosidad del material acabado. Esa información se puede así incorporar inmediatamente al proceso de control.

El programa informático que realiza el modelado fluidodinámico podría resultar todavía exasperantemente lento. Se necesitan, además, nuevos sensores, tales como los que suministran la configuración de la estructura cristalina del compuesto. Y hay que lograr que el soporte informático del control absorba la ingente cantidad de información procedente de los sensores.

En lugar de tratar de simular la dinámica del proceso, algunos han optado por operar con sistemas expertos y otras técnicas de inteligencia artificial que están capacitadas para incorporar la intuición de los especialistas. Un centro de la Armada emplea métodos de inteligencia artificial para controlar la pulverización de gotículas metálicas que se depositan sobre un accesorio acabado. En efecto, allí los técnicos relacionan el grado de aspereza superficial durante la fabricación con el acabado final de la pieza; una cámara de vídeo digitaliza la imagen mientras el metal líquido se pulveriza sobre un substrato que después se tira. Los datos sobre la aspereza de la superficie, la velocidad de crecimiento y la forma del objeto ayudan a predecir la porosidad, presencia de grietas y otras cualidades de la pieza acabada. El sistema experto decide cómo ajustar el proceso.

Para controlar la presión de gases y otras variables, la directora del proyecto, Angela L. Moran, se fundó en la lógica difusa, técnica de inteligencia artificial que puede cuantificar descripciones vagas o imprecisas ("grande", "pequeño"). La lógica difusa, o borrosa, permite que la presión, caudal de metal y otros valores se ajusten ligeramente más altos o más bajos hasta que se alcancen las propiedades deseadas, acción que intenta imitar los sutiles ajustes realizados por un operador.

El complicado proceso de pulverización usado por la Armada se había ideado para producir piezas con destino a los submarinos, buques y aviones. Con la desaparición de la guerra fría, se considera su aplicación a las necesidades de la industria. Los ingenieros de la Base Wright-Patterson de la Fuerza Aérea trabajan en la adaptación de los algoritmos generados para mantener la estabilidad de aviones en vuelo a la labor más mundana de ajustar un proceso de fabricación: en vez de ajustar la guiñada, el picado y el balanceo, los datos de salida serán temperatura, velocidad de deformación y tiempo.

La industria del acero espera también beneficiarse del PIM. El Instituto Norteamericano del Hierro y el Acero, grupo empresarial que representa a los fabricantes de acero, solicitó recientemente del Departamento de Energía el desarrollo de sensores, modelos y métodos informáticos de control. Acuden a la administración pública porque se trata de cuestiones de ciencia fronteriza para cuya investigación la industria privada carece de los recursos precisos.

La incorporación del PIM a la fabricación del acero y otros materiales no será barata. Pero el procesado inteligente podría constituir la única baza para progresar más allá de un conjunto de destrezas sin más complicación que la de pinchar la tarta con un palillo para comprobar que esté en su punto.

Láseres

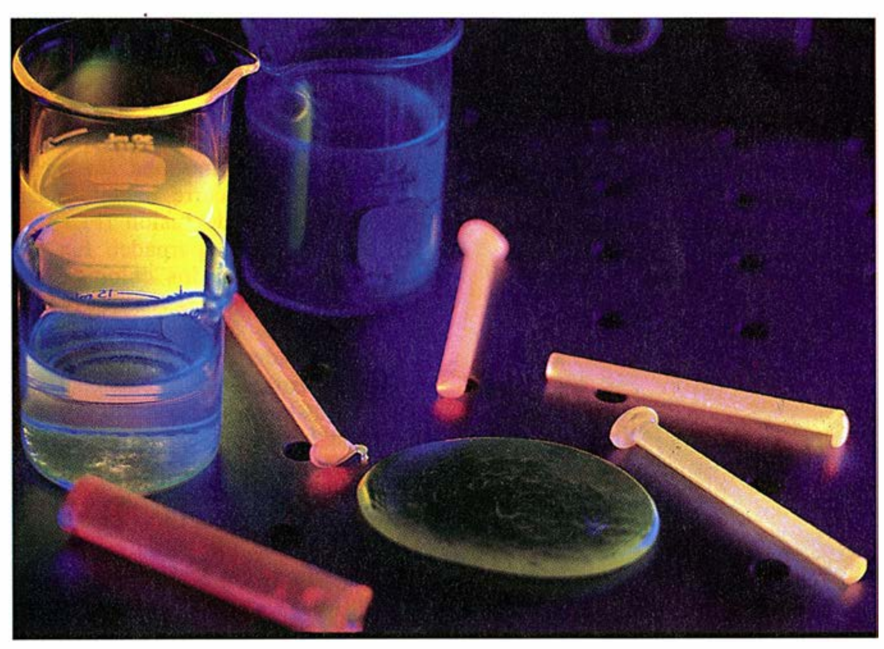
y vidrios

A finales de los años setenta, dos químicos de Corning Glass Works —Paul A. Tick y Leon Michael Sanford— consiguieron un tipo de vidrio que se fundía y fluía a una fracción de las altísimas temperaturas que se acostumbran en la fabricación de ventanas y botellas. En algunos casos, aquellos vidrios, amasados de plomo, estaño y fósforo, se formaban al calor preciso para preparar una taza de té o café.

De momento, esos vidrios son todavía una rareza, encerrada en los laboratorios de Corning, Nueva York. A unas 10.000 pesetas el kilo, los vidrios de bajo punto de fusión centuplicarían el coste del vidrio común que se hace de silicatos. Pero Tick confía en que su invención se convierta pronto en un apreciado elemento de una nueva clase de materiales para la creación de láseres y otros componentes requeridos en el sector de las comunicaciones ópticas y en el de la informática. Para tales aplicaciones de alta tecnología, el coste sería un inconveniente menor.

A diferencia de otros modelos anteriores de bajo punto de fusión, este vidrio resiste el ataque inmediato, y destrucción consiguiente, por parte del agua. Tick obtuvo la patente en 1982 (Sanford murió poco después de que los dos acabaran su trabajo inicial), y, de acuerdo con el protocolo de la misma, ese material se consigue por fusión conjunta de plomo, estaño y fósforo en presencia de oxígeno y flúor. Los vidrios de fluorofosfato de plomo y estaño pueden, y eso es característica suya, procesarse en el mismo dominio de bajas temperaturas que muchos materiales orgánicos con los que se mezclan fácilmente. Lo hacen igualmente con cobre, aluminio y acero inoxidable a temperaturas inferiores a las que se degradarían las conexiones soldadas. Además, son impermeables a los gases y el agua.

Se les promete un campo seguro en el sellado de componentes electrónicos, resguardándolos del aire y el agua. Pero su futuro más brillante apunta hacia los láseres, guías de ondas, amplificadores y otros dispositivos ópticos no lineales. Fue en la Universidad de Rochester donde un grupo encabezado por el catedrático de óptica Robert W. Boyd puso de manifiesto, en 1987, las propiedades no lineales del vidrio cuando se contaminaba con acridina, un colorante orgánico. La intersección entre dos haces de luz en un vidrio portador de ese colorante determinaba la transfe-



LOS VIDRIOS de bajo punto de fusión contienen el mismo tipo de colorantes orgánicos que se muestran en los vasos de precipitados. Corning quiere usar estos vidrios para alterar la luz de varias maneras que pueden ser útiles para comunicaciones ópticas e informática. Foto: Robert Prochnow.

rencia de una pequeña cantidad de energía de un haz al otro; se descubría así un medio potencial de transmitir información entre señales separadas.

Tick y David L. Weidman, físico que trabaja en Corning, esperan presentar en breve el primer láser de frecuencia variable, hecho a partir de los vidrios mediante el dopado de una fibra óptica con otro colorante orgánico, la rodamina. La excitación del colorante por la luz producida por un láser de argón, de longitud de onda relativamente corta, debe facultarle al tinte para emitir luz coherente en una banda de longitudes de onda mayores. Para seleccionar las longitudes de onda deseadas se empleará un elemento óptico: una placa que ajusta la polarización de la luz.

Sin embargo, antes de obtener un láser eficaz, habrá que descubrir la forma de fabricar fibras de bajas pérdidas a partir de vidrios de fluorofosfato de plomo y estaño. Hasta ahora, Tick y Weidman han conseguido fibras con pérdidas de 10 decibeles por metro en una fibra sin contaminar. Tendrán que decuplicar ese rendimiento si quieren construir un aparato práctico de algunos metros de longitud.

El equipo de Corning está tropezando con problemas en los que otros investigadores han creído ver un consejo para descartar el uso de materiales orgánicos en dispositivos ópticos. Nos referimos, por ejemplo, a la tendencia de algunas moléculas de colorante a romperse en presencia de una fuente excitadora de luz.

Además de láseres, las fibras dopadas de sus cristales servirán para fabricar conmutadores ópticos y otros dispositivos no lineales. Se las imagina también aplicadas a los amplificadores ópticos. De momento se están ensayando fibras de vidrios convencionales contaminadas con erbio como sustitutos de los "repetidores" en las redes de comunicación óptica a larga distancia que restablecen la intensidad de la señal.

Los láseres por colorante no emiten luz de las longitudes de onda adecuadas para sistemas de telecomunicaciones, pero Tick y Weidman esperan que puedan emplearse a longitudes de onda más cortas para amplificar señales en redes informáticas ópticas de área local. Se habla de su aplicación potencial a los amplificadores capacitados para multiplicar señales antes de que se divida a lo largo de diferentes caminos en la red de área local. Cada una de las señales que divergen retendría entonces suficiente potencia.

Visión cromática

AVICO

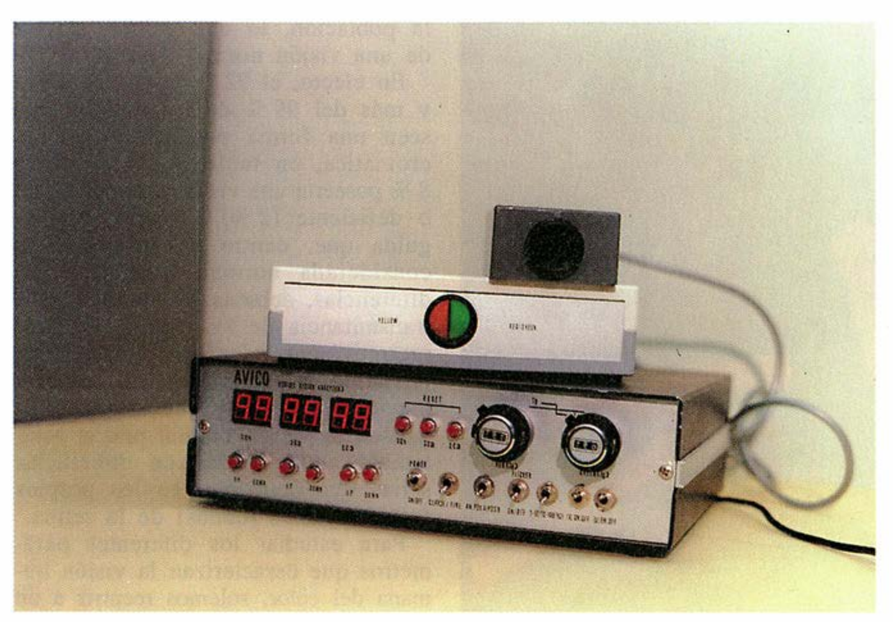
No podemos comparar directamente las percepciones de distintos individuos, ni siquiera la percepción del color. Ahora bien, las pruebas objetivas que podemos realizar nos demuestran la existencia de una gran similitud en un elevado porcentaje de la población, lo que permite hablar de una visión normal de colores.

En efecto, el 92 % de los hombres y más del 99 % de las mujeres poseen una forma parecida de visión cromática, en tanto que el restante 8 % poseería una visión anómala (6 %) o deficiente (2 %). Digamos en seguida que, dentro de la población considerada normal, menudean las diferencias, debidas, sobre todo, a la transmitancia de los medios oculares prerretinianos (córnea, humor acuoso, cristalino y humor vítreo), aunque hay quien sostiene que la variabilidad en la visión normal podría estar también relacionada con diferencias serias que ocurrirían en los propios fotorreceptores (conos) de la retina.

Para estudiar los diferentes parámetros que caracterizan la visión humana del color, solemos recurrir a un dispositivo diseñado específicamente en el laboratorio para una función determinada: detección y clasificación de una anomalía o una deficiencia cromática, evaluación de los umbrales de discriminación ("mínima diferencia perceptible") de luminancia (claridad) o de cromaticidad (tono y saturación), sensibilidad al contraste, sensibilidad al parpadeo, y otros. Todos estos dispositivos tienen en común el empleo de una fuente de luz, un sistema de variación de luminancia (mediante filtros neutros o un par polarizador-analizador) y un sistema que permita obtener el color o colores deseados (mediante filtros cromáticos de gelatina o de vidrio o filtros interferenciales), con lo que finalmente, y gracias a un sistema óptico adecuado, se obtendrá un test sobre una pantalla difusora (vidrio esmerilado), que será lo que "vea" el individuo sometido a observación.

Todos estos componentes ópticos absorben una gran cantidad de luz y requieren una fuente de alta potencia, verbigracia, una lámpara halógena o un arco de mercurio o xenón, no exentos de riesgos. Y el montaje es aparatoso, complejo, difícil de calibrar y caro. Pero en los últimos años se han ideado y comercializado aparatos para detectar y evaluar las anomalías de la visión del color (anomaloscopios) que emplean por fuente lumínica diodos electroluminiscentes (DEL), controlados electrónicamente.

En esa línea, el autor ha patentado un analizador de la visión del color, el sistema AVICO, diseñado como un aparato base (donde se encuentra toda la electrónica), al que pueden conectarse diferentes módulos o cabezales ópticos (donde se encuentra la fuente de DEL y el sistema óptico formador del test). El empleo de es-



ANALIZADOR de la visión del color (AVICO). En la cara anterior del aparato base se dispone de diferentes escalas para el ajuste de los distintos parámetros de interés: luminancia de cada color, modulación luminosa, frecuencia de parpadeo, modulación temporal, etc. Los cabezales ópticos (test de campo bipartito y test de campo circular) se conectan en la cara posterior, donde se dispone también de salidas para los instrumentos de control (osciloscopio y frecuencímetro).

tos diodos en dispositivos para colorimetría y en general para estudios de la visión cromática presenta importantes ventajas: alto rendimiento luminoso y estrecha anchura de banda (del orden de 30 nanómetros), que permite obtener colores de máxima pureza colorimétrica. Por otra parte, la precisión y estabilidad en el control electrónico de los parámetros sobre los DEL pueden considerarse cuando menos comparables a las que se obtienen mediante dispositivos puramente ópticos convencionales. Aunque las posibilidades del sistema AVICO son múltiples, nos ceñiremos a las dos funciones más empleadas hasta hoy.

La primera nos remite al módulo anomaloscopio. Para la detección y diagnóstico de una anomalía cromática se necesita un test de campo bipartito: test circular dividido en dos mitades, en una de las cuales se presenta un color amarillo (DEL con pico en 590 nm) y en la otra se realiza la mezcla de rojo (DEL con pico en 660 nm) y de verde (DEL con pico en 565 nm) en la proporción necesaria para conseguir la igualación del amarillo que sirve de referencia. A esa operación la denominamos ecuación colorimétrica; la ecuación que iguala la suma del rojo más verde al amarillo se conoce por ecuación de Rayleigh.

En el aparato base se dispone de dos escalas, una de las cuales indica la luminancia del amarillo (desde 0 a 99) y la otra indica la proporción de luminancias L_R/L_V desde 0 (rojo puro) a 99 (verde puro). El observador realiza la igualación del amarillo partiendo desde el rojo puro y también partiendo desde el verde puro; con ello determina el rango de L_R/L_V dentro del cual puede obtenerse la igualación del amarillo mediante un ligero ajuste de su luminancia.

Se tiene, pues, que la ecuación colorimétrica no se realiza para un único valor de L_R/L_V, sino dentro de cierto intervalo de valores de dicha razón. Calibrando el sistema mediante una cantidad suficiente de sujetos normales (así reputados por otros criterios previos), se obtiene un rango estadístico normal, que nos servirá de patrón para diagnosticar si la visión cromática de un individuo es normal o no. Aunque suele atribuirse al daltonismo toda anomalía en la visión cromática, la verdad es que existen muchos tipos de anomalías cromáticas, cuya clasificación puede realizarse adecuadamente comparando el rango de igualación del sujeto (tanto el punto medio como el tamaño) con el rango estadístico normal.

La segunda función afecta al módulo parpadeo. Llámase "parpadeo", en óptica, al estímulo luminoso cuya luminancia varía periódicamente con el tiempo, caracterizándose por su frecuencia. En el caso más sencillo, el parpadeo es simplemente la secuencia de luz-oscuridad, siendo la luz de cualquier color. Pues bien, si la frecuencia encendido/apagado se va progresivamente incrementando, el parpadeo será cada vez menos perceptible, y a partir de una frecuencia determinada dejará de percibirse, para apreciarse como una luz estable; cuando eso ocurre hablamos de frecuencia crítica de fusión (FCF).

Si en vez de un parpadeo luz-oscuridad, alternamos dos colores (por ejemplo, rojo y verde), lo que veremos cuando la frecuencia sea baja será un parpadeo de colores. Si vamos incrementando la frecuencia, llegará un instante en que dejará de percibirse la alternancia de los colores y sólo se verá la mezcla de ambos (en este caso amarillo); hablaremos entonces de frecuencia crítica de fusión cromática (FCFC).

Si las luminancias de los colores alternantes eran iguales, en el punto de fusión de los colores dejará de percibirse también el parpadeo: el amarillo percibido se mantendrá estable. Pero si las luminancias eran distintas, a partir del punto de fusión de los colores percibiremos un "amarillo parpadeante", por la razón evidente de que la frecuencia de fusión del parpadeo luminoso es mayor que la frecuencia de fusión del parpadeo cromático. En efecto, si continuamos aumentando la frecuencia por encima de la FCFC alcanzaremos finalmente una nueva frecuencia para la que el amarillo se verá ya estable: la frecuencia de fusión del parpadeo (FFP). Si el parpadeo está formado por la secuencia luz-oscuridad, la FFP coincide con la FCF definida antes.

Un estímulo de parpadeo puede obtenerse sobre un test de campo circular mediante diodos electroluminiscentes de rojo-verde. En el aparato base se dispone de varias escalas desde donde se puede regular la proporción de luminancias L_R/L_V a alternar y la frecuencia del parpadeo, con lo que la FCFC y la FFP pueden ser determinadas. Este tipo de medidas, además de su interés teórico para el estudio de las propiedades temporales del sistema visual, podría tener también importantes aplicaciones en la detección y seguimiento de patologías oculares.

La medida del umbral diferencial de luminancia (mínima diferencia perceptible de luminancias de un color dado) o del umbral absoluto (mínima cantidad de luz de un color dado que el ojo es capaz de detectar) son otras de las aplicaciones que podrían desarrollarse con AVICO. (Pascual Capilla. Departamento de óptica de la facultad de física de la Universidad de Valencia.)

Taller y laboratorio

James B. Kaler

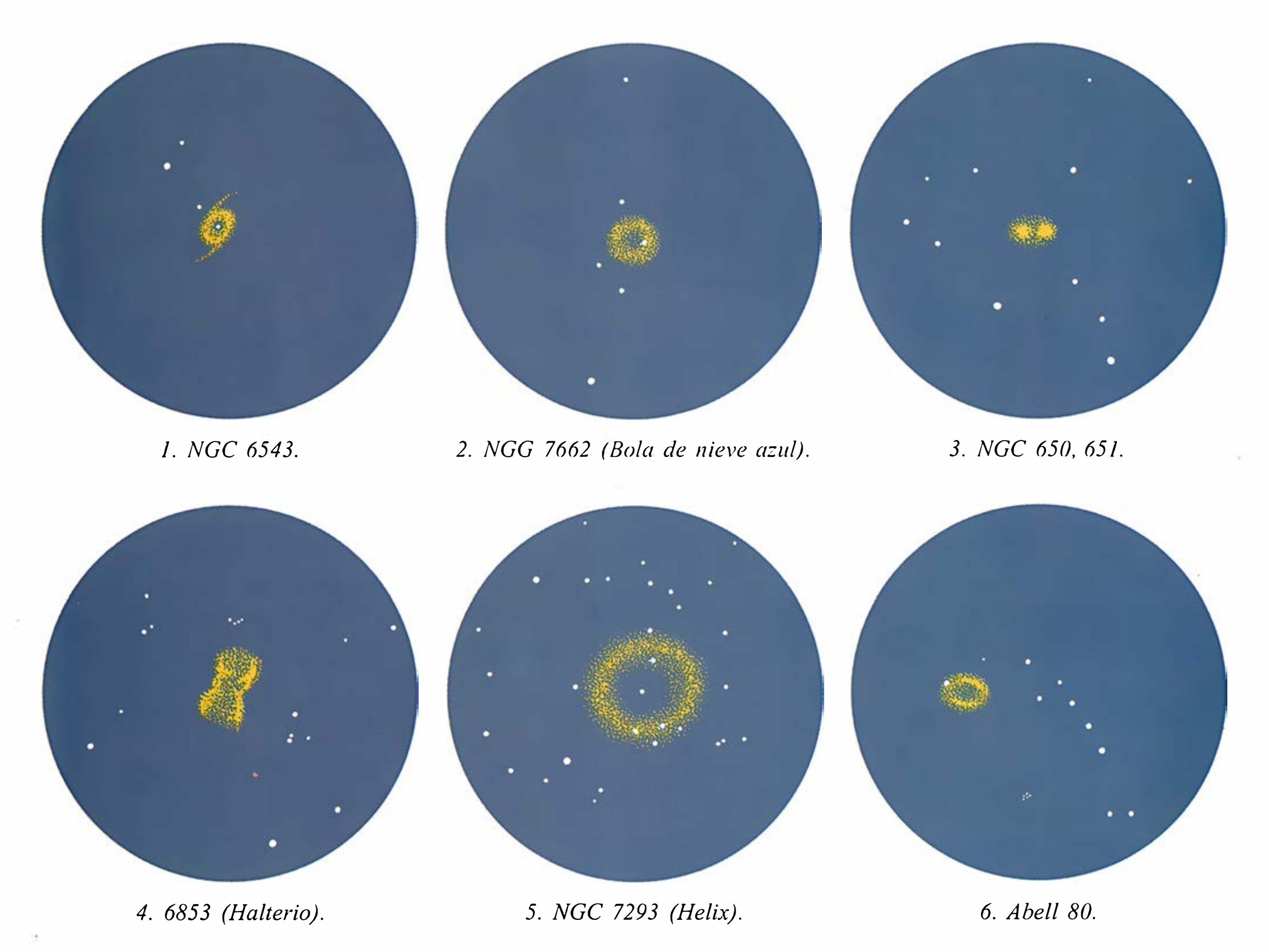
Muerte de una estrella

Cuando, llegada la noche, levantamos la mirada al firmamento, acaso pensemos que ese cielo estrellado ha permanecido así, inmutable, desde la eternidad. Pero no es verdad. Cuando observo, aun a simple vista, las formaciones de estrellas que cubren la bóveda celeste, distingo señales de su lenta evolución desde que eran objetos estelares jóvenes hasta que se convirtieron en ancianas y tenues concentraciones de materia.

JAMES B. KALER enseña astronomía en la Universidad de Illinois. Hábil divulgador, ha escrito más de cien artículos científicos sobre las fases tardías de la evolución estelar.

Hace poco invité a un grupo de astrónomos aficionados a unas veladas de observación de estrellas en las etapas finales de sus ciclos vitales. Aguzando la vista y valiéndonos de algunos telescopios, nos dedicamos a la exploración del firmamento en busca de sus ciudadanos más añosos. Nos concentramos, en particular, en el examen de los restos de algunas de las estrellas más viejas, es decir, en las nebulosas planetarias (véase el artículo sobre el tema que en este número de la revista escribe Noam Soker). Tales concentraciones de gas y polvo se cuentan entre los más bellos objetos del universo.

Comencemos nuestro recorrido por una estrella de mediana edad perfectamente conocida: el Sol. Igual que la mayoría de sus congéneres, vive de las reacciones de fusión termonuclear merced a las cuales los átomos de hidrógeno se combinan dando helio y se libera energía. Al cabo de algunos miles de millones de años, el núcleo de nuestro astro habrá agotado su reserva de hidrógeno y empezará a morir, contrayéndose y calentándose mientras en su torno prosigue la fusión del hidrógeno. Poco después, el astro se estabilizará cuando el residuo de helio que le quede en el núcleo comience a reaccionar por fusión termonuclear. Entonces, su diámetro habrá crecido tremendamente, se mostrará cien veces más brillante y se habrá vuelto naranja e incluso rojo. Nuestro Sol



1. NGC 6543. *2. NGG 7662 (Bola de nieve azul).* *3. NGC 650, 651.*

4. 6853 (Halterio). *5. NGC 7293 (Helix).* *6. Abell 80.*

se habrá transformado en una gigante roja.

Afortunadamente no viviremos para verlo. Pero sí hemos observado estrellas ancianas de ese tipo. La mayoría de las estrellas naranjas o rojas visibles a simple vista son gigantes rojas. En primavera, por ejemplo, podemos localizar a la estrella Arturo, brillante y roja, en la zona occidental del firmamento; en invierno, en la constelación de Tauro aparece Aldebarán.

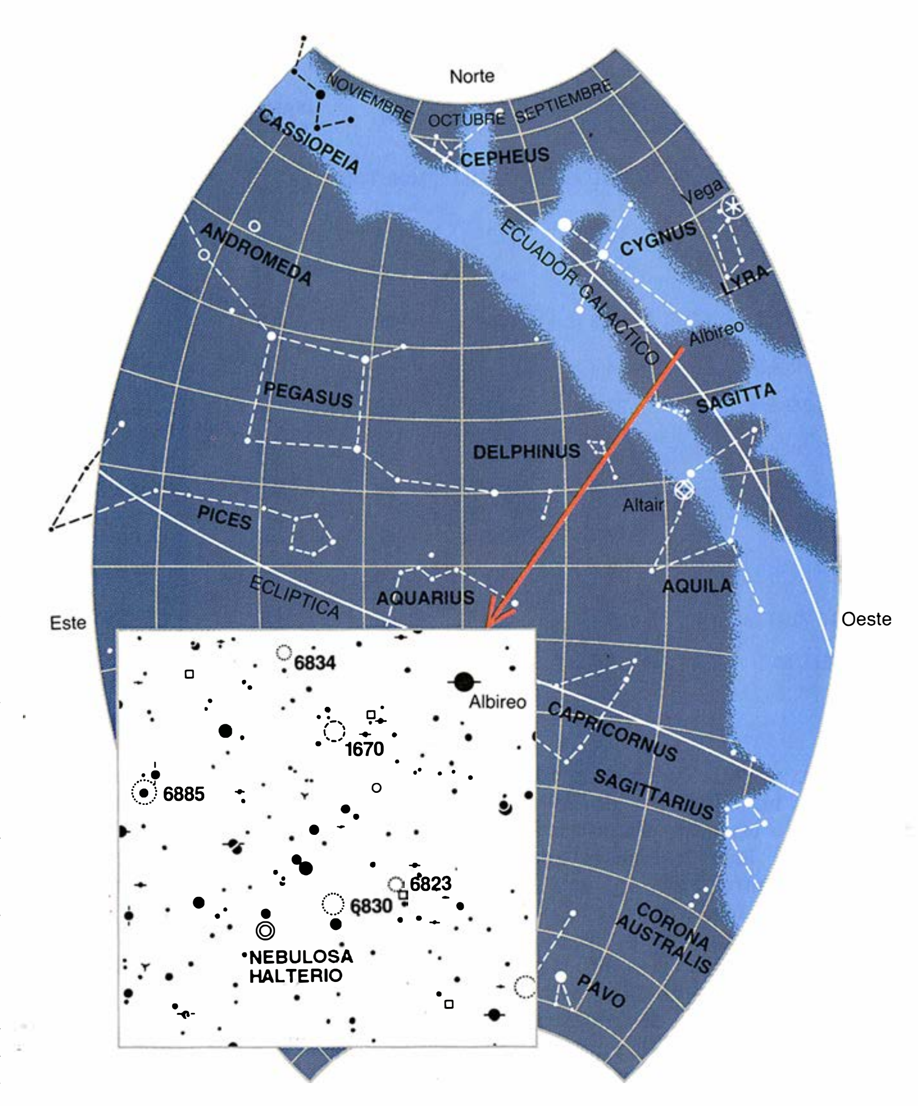
Las gigantes, conforme envejecen, consumen el helio del núcleo, y en su centro queda un residuo de carbono y oxígeno con capas exteriores de helio e hidrógeno en fusión termonuclear. En este proceso, las estrellas resplandecen, aumentan y enrojecen todavía más. Cuando el Sol llegue a esta etapa (llamada simplemente AGB) probablemente abarcará la órbita terrestre.

Percibir la estrellas AGB cuesta algo más que distinguir gigantes comunes. A simple vista pueden verse algunas estrellas AGB y con un pequeño telescopio aparecen muchas. Cuando una estrella AGB se acerca a su brillo y tamaño máximos, se hace inestable y su luminosidad fluctúa. Un ejemplo excelente lo tenemos en la estrella Mira, "la maravillosa". Durante casi todo el tiempo permanece invisible, pero cada once meses, aproximadamente, se muestra como una de las más brillantes de la constelación de la Ballena. Se la identifica fácilmente con un buen mapa de las constelaciones.

Por ser tenue y turbulenta la zona exterior de las estrellas AGB, éstas despiden materia a un ritmo muy intenso, algo así como el triple de la masa de la Tierra en un año. Tras decenas de millares de años, de la estrella no quedará nada, salvo su núcleo, caliente y denso, y una enorme nube de gas. El núcleo guarda aún energía suficiente para generar un fuerte viento estelar que comprimirá, en una envoltura, parte de la materia desechada. La estrella central emitirá radiación ultravioleta, que iluminará la capa formada: acaba de nacer una nebulosa planetaria.

Transcurridos unos cincuenta mil años, la nebulosa se expande hacia dimensiones interestelares y sus gases se mezclan con los del espacio, al tiempo que la estrella central palidece y se convierte en un resto muerto y denso, en una enana blanca. Tal es el destino de la mayoría de las estrellas.

No hay nebulosas discernibles a simple vista. Pero unos buenos prismáticos nos permitirán ver algunas.



7. LA NEBULOSA DE HALTERIO, fácilmente visible con prismáticos, se halla justo al lado de la estrella Albireo (Beta Cisne) en la constelación del Cisne, al pie de la Cruz del Norte.

Por ejemplo, el brillo de la nebulosa de Halterio (cuya forma recuerda a un reloj de arena) destaca sobre el de las otras estrellas de la oscura constelación de la Zorra, debajo de la Cruz del Norte [*véase la ilustración superior*].

Para docenas de otros objetos precisaremos del auxilio de un telescopio, una buena colección de mapas astronómicos y un conocimiento práctico del cielo. Antes de que el lector desempolve su telescopio, o se lo pida prestado a un amigo, le conviene aprovechar la experiencia de los ocho astrónomos aficionados que se ofrecieron a escrutar el cielo en busca de nebulosas planetarias.

Nuestros colaboradores fueron reclutados por Wayne Wyrick, director del Planetario Kirkpatrick de Oklahoma City. Los ocho voluntarios reunían un conjunto de telescopios cuyos diámetros variaban entre los diez y los sesenta centímetros. Para hacer más provechosa la velada astronómica, yo había preparado una recopilación de objetos a observar; unos los había elegido pensando en su fácil identificación por parte de los aficionados, y otros pondrían a prueba las limitaciones de los instrumentos y la pericia de los observadores [*véase la tabla*]. Para mi asombro, pudimos examinar con cierto detalle todas las nebulosas de la tabla.

Las nebulosas planetarias son brillantes, aunque pequeñas. Aumentan de tamaño a medida que envejecen. La estrella central, además, calienta la nube gaseosa, cuyo brillo se aviva y cela la estrella. Finalmente, ésta se oscurece y la nebulosa sigue creciendo. Una nebulosa antigua puede adquirir tal proporción, que resulte difícil distinguirla sobre el fondo del firmamento.

Las nebulosas más jóvenes de la lista eran NGC40 e IC418. La primera la buscaron Larry Mitchell, de

Nebulosa Planetaria

NOMBRE	ASCENSION DERECHA		DECLINACION		DIAMETRO ANGULAR	DISTANCIA DESDE LA TIERRA
	HORAS	MINUTOS	GRADOS	MINUTOS	ARCOS DE SEGUNDO	AÑOS-LUZ
NGC 40	0	10.4	+72	29	36	4,000
IC 418	5	27.1	–12	42	12	2,000
NGC 6543	17	56.8	+66	38	15	3,200
NGC 7009	21	2.2	–11	24	28	3,900
NGC 7662	22	23.5	+42	29	30	3,800
NGC 7027	21	6.7	+41	14	14	3,900
NGC 650	1	41.8	+51	31	140	3,600
NGC 6853	19	59.2	+22	42	360	800
NGC 6720	18	53.2	+33	1	70	2,600
NGC 7293	22	29.1	–20	50	800	500
ABELL 80	22	34.7	+52	24	240	5,700

Houston, y Phil Kuebler, de Columbus, con un telescopio de 25 centímetros. No les costó encontrar la nebulosa, un halo levemente apagado en cuyo centro destacaba una estrella. Con su telescopio de 60 centímetros, otro aficionado, Mike Dennis, de Oklahoma City, dijo apreciar "una traza de sombreado verdoso". IC 418 es difícil de observar. Al principio, Kuebler sólo pudo vislumbrar un extraño astro, pero perseverando logró descubrir una nebulosidad de contornos definidos.

Centramos luego nuestra atención en NGC 6543, una nebulosa extraordinaria, tanto óptica como históricamente. En 1864 William Huggins estudió su espectro luminoso y encontró unas misteriosas rayas que en aquel entonces resultaban extrañas y que se atribuyeron a un elemento desconocido que se bautizó como nebulium. Tales rayas las identificó, 64 años después, Ira S. Bowen, del Instituto de Tecnología de California, como debidas a oxígeno doblemente ionizado.

Vista por un telescopio, NGC 6543 se presenta de un verde fantasmal. "Es inconfundible", dijo Clive Cadle, también de Oklahoma City, mirando por su telescopio de 25 centímetros. La estrella central pudo vislumbrarla fijando la vista en una zona levemente desplazada hacia la derecha o la izquierda de la estrella. (Esta técnica de visión sesgada, tal es su denominación técnica, se basa en que las zonas externas de la retina son más sensibles a la luz que el centro.)

Cuando Barbara Wilson, de Houston, observó NGC 6543 con un telescopio de 50 centímetros, le pareció que la nebulosa "se asemejaba a un ojo de gato, un óvalo verde con un ovoide oscuro". Pudo ver sin dificultad la estrella central.

El arquetipo de todas las nebulosas es NGC 7009, en la constelación de Acuario, hermoso objeto que recibe el nombre de nebulosa de Saturno a causa de sus borrosos resaltos, o ansas. Descubierta por William Herschel en 1782, fue la primera nebulosa planetaria conocida.

Con un telescopio de 20 centímetros, Beryl Cadle, esposa de Clive, vio "una nebulosa ovalada, brillante, grande y azulada, de contorno impreciso". Con el suyo de 50 centímetros, Wilson observó ansas y estructura de doble capa. (Cada capa podría representar un episodio diferente de pérdida de masa.) Las ansas podrían constituir chorros de materia expulsada desde la estrella central. Esta, por cierto, nadie pudo verla; el brillo de la nebulosa la oculta.

Le tocó el turno a la Bola de Nieve Azul, o NGC 7662, en la constelación de Andrómeda. Con un telescopio de 25 centímetros, Kuebler observó "una pequeña nebulosa brillante y azul" con un "agujero" dentro del disco. Con telescopios más potentes, Wilson distinguió un anillo de gas y una aglomeración de materia brillante en el costado sureste. Si me sirvo de un telescopio profesional de 100 centímetros, diviso dos anillos y la estrella central. A causa de su estructura en triple capa y núcleo caliente (100.000 kelvins), la nebulosa ha sido objeto de intensa investigación.

En NGC 7027 la estrella llega a los 180.000 kelvins. Para conseguir observar la estrella, aunque sea un poco, los astrónomos deben recurrir a refinados sistemas ópticos. La nebulosa es en sí bastante compacta y parece plana. Clive Cadle la estuvo buscando con un telescopio de 25 centímetros, pasando por encima de ella varias veces porque presentaba el aspecto de una estrella común. Con un telescopio de 60 centímetros, Dennis vio claramente "una pequeña mancha nebulosa de color verdoso... que se hacía más difusa hacia los bordes". Con tan modestas descripciones, cuesta creer que NGC 7027 se haya convertido en la nebulosa planetaria más observada por los profesionales de la astronomía.

Una de las nebulosas más viejas tiene dos números de catálogo, NGC 650 y 651, en razón de sus dos lóbulos. Los sistemas de este tipo, conocidos como nebulosas planetarias bipolares, aparecen cuando la estrella central pierde materia en algunas direcciones preferentes. Con telescopios de 25 centímetros, Kuebler y Mitchell disfrutaron con los lóbulos.

Las tres nebulosas mejor conocidas son Halterio (o Dumbbell), Anillo, en la constelación de Lira, y Helix, en la constelación de Acuario. La nebulosa de Halterio (NGC 6853) es uno de los objetos más bellos del firmamento. Parece un enorme móvil de galería de arte suspendido de un fastuoso apiñamiento de estrellas en la Vía Láctea. Lina Mac Arthur perfiló, con un telescopio de 10 centímetros y bajo alumbrado suburbano, no sólo su contorno de reloj de arena, sino también detalles de los bordes. Kuebler, con un instrumento de 25 centímetros, describe la nebulosa como de color "azul-verdoso" y de "aspecto impresionante".

Por su forma de aro de humo, a la nebulosa del Anillo (NGC 6720) Herschel ni siquiera la clasificó como planetaria. Con un telescopio de 60 cm, Dennis no sólo pudo ver una tenue nebulosidad sino también la pálida estrella central.

La última del trío es Helix (NGC 7293). Se trata de la nebulosa planetaria más cercana a la Tierra, distante unos 500 años luz. Dada su longevidad, es enorme. Además, al estar tan cerca, abarca una región del cielo que es casi la mitad del diámetro angular de la Luna llena. Por tanto, para observarla lo mejor es un telescopio de campo ancho y pocos aumentos. Incluso sólo con prismáticos, Wyrick pudo divisarla como una "man-

cha grisácea" y apreció indicios de su estructura anular. Con telescopios de 25 centímetros, Clive Cadle y Mitchell vieron nítidamente su fantasmal conjunto de anillos entre las estrellas.

Como reto final, solicité al grupo que buscara Abell 80, una nebulosa planetaria cercana al final de su existencia. Gigantesca y tenue, desaparecerá para siempre de nuestra vista más o menos en los próximos 10.000 años. Para percibirla se necesita un telescopio de 50 centímetros o más. Aun así, la proeza se mostró difícil. Wilson, Mitchell y Drake pasaron más de una hora ante el ocular, recurriendo a todos los trucos de que se valen los dedicados a la astronomía amateur: se cubrieron las cabezas para impedir el paso a la luz superflua, sesgaron la visión y emplearon un filtro reforzador de contrastes que dejaba vía libre a las rayas nebulium de oxígeno.

Los tres describieron y dibujaron la misma imagen, con lo que pudimos estar seguros de que de veras estaban viendo a Abell 80. Wilson reconoció dos estrechos arcos. "A veces parecía que toda la nebulosa pudiera verse cual un resplandor difuso", nos explicó, "pero en realidad percibí que era una ilusión y sólo podía describirse el lóbulo occidental". Mitchell halló un borde noroeste más brillante y Drake vio un resplandor redondo, difuso y tenue, que se disolvía en el fondo.

Hace algunos años que estuve observando a Abell 80 con un telescopio de un metro, para medir su brillo. Nunca lo vi directamente ya que empleé instrumentación electrónica. En nuestra entretenida velada astronómica se me ofreció una segunda oportunidad y creí haberla visto. Pero luego me pregunté si no se habría tratado de una mera ilusión. Confío en que así no fuera. Era aquella una ocasión de oro para asistir a la agonía final de una nebulosa planetaria antes de su desaparición definitiva en el vacío, cuando sus gases contribuyan a alumbrar otra generación de estrellas.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

PHYSICS OF THERMAL GASEOUS NEBULAE. Lawrence H. Aller. D. Reidel Publishing, 1984.

THE GUIDE TO AMATEUR ASTRONOMY. Jack Newton y Philip Teece. Cambridge University Press, 1988.

ATOMS, STARS, AND NEBULAE. Lawrence H. Aller. Cambridge University Press, 1991.

Juegos matemáticos

Ian Stewart

La olimpiada interplanetaria

El presidente del recién constituido Comité Olímpico Interplanetario se puso en pie, mientras los demás reclamaban silencio. "Señoras y señores delegados: nos hallamos en una ocasión histórica. El año próximo, 2092 de nuestra era, se celebrará la 50 edición de los Juegos Olímpicos de la era moderna. Y también, inútil recordarlo, los primeros Juegos Olímpicos Interplanetarios de todos los tiempos. Lo cual, obviamente, ha suscitado problemas logísticos sin precedente. Para no tener que transportar a millones de personas de un lado a otro del Sistema Solar, se adoptó el acuerdo de celebrar simultáneamente los Juegos en los diez planetas de la Federación Olímpica Interplanetaria: Mercurio, Venus, Tierra, Marte, Júpiter, Saturno, Urano, Neptuno, Plutón y por último, aunque no menos importante, el Enclave Lunar."

"Para dejar constancia en el acta, ¿podría, señor Presidente, explicar cuál va a ser el procedimiento exacto?", reclamó el delegado de Neptuno.

"Las pruebas que plantean menos problemas son las de campo", replicó el presidente. "Los competidores, en cada mundo, actuarán bajo la supervisión de jueces locales. Los resultados globales serán cotejados por el Comité Central. Se concederán medallas a los atletas que consigan las tres mejores marcas. Los mismos principios valen para las carreras en pista."

La delegada selenita pidió la palabra: "Señor Presidente, mi Comité Planetario desea formular una objeción. Nosotros estimamos que el mayor diámetro de Júpiter ofrecerá a sus atletas una ventaja indebida en las pruebas de halteras", lanzó la delegada de la Luna.

"Pero, ¿qué está diciendo? ¡Eso es absurdo!" saltó indignado el representante joviano.

"Está perfectamente demostrado que en las pruebas de esfuerzo explosivo, los atletas mejoran su rendimiento cuando se desarrollan a gran altura", explicó la delegada lunar. "Dado que la altura es por definición la distancia al centro del planeta, el enorme diámetro de Júpiter les proporciona inmensa ventaja a los jovianos."

"¡Por el amor de Dios! ¿Está hablando en serio?", preguntó el presidente. "¡Me deja de una pieza!"

El delegado de Júpiter se puso en pie, enojado. "¿No se le ha ocurrido al Enclave Lunar que la mayor gravedad de Júpiter supone una considerable desventaja para su equipo de halterofilia?", expuso, con voz rezumante de sarcasmo. "Tal hecho compensa con creces cualesquiera pretendidos efectos de la altura, la cual, en todo caso, habría de ser medida sobre el nivel del mar y no desde el centro del planeta."

"Todo eso está muy bien", dijo el delegado de Saturno. "Pero ustedes saben perfectamente que la elevada gravedad hace mucho más difícil lanzar a gran distancia la jabalina en Saturno que en Marte."

La selenita no podía quedarse quieta. "Formulo la moción de que los resultados del concurso de levantamiento de peso sean ajustados para compensar el efecto de diámetro planetario."

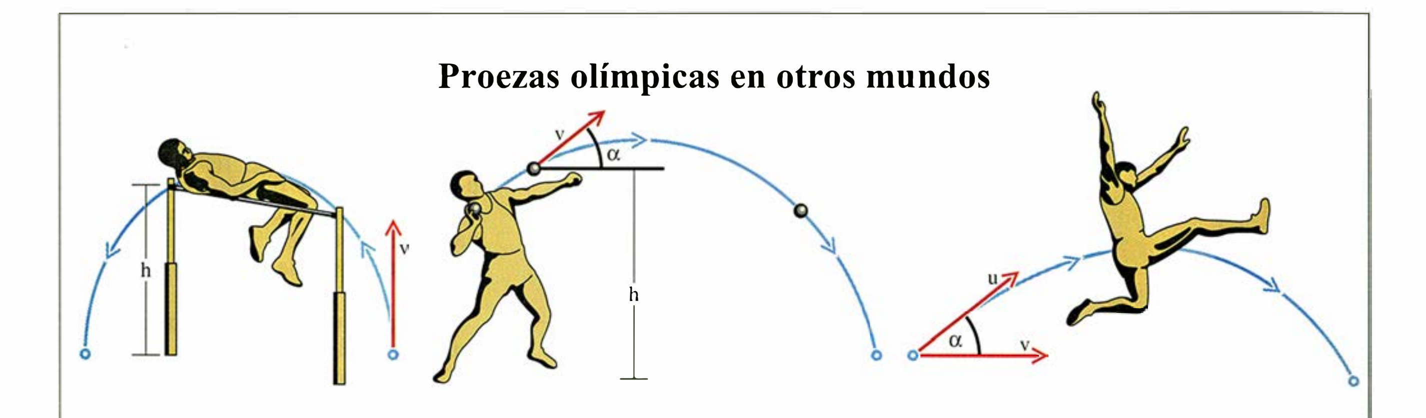
"¡Secundamos la moción!", clamaron al unísono Plutón y Mercurio.

"¡Pero eso es estúpido!", gritó airado el delegado de Júpiter. "La Luna tiene un diámetro pequeño y también muy poca gravedad. ¡Cualquiera puede ya levantar toneladas en la Luna, y aun así siguen empeñándose en deformar todavía más las cifras a su favor!"

El presidente dejó escapar un suspiro. "Compañeros delegados", dijo, "está claro que hemos tropezado con una cuestión fundamental. Las condiciones locales distan de ser uniformes en todos los lugares del Sistema Solar. La realidad es que no podemos afrontar la cuestión por partes; la compensación correcta de las condiciones locales dependen del deporte. Propongo que establezcamos un pequeño subcomité para que examine la cuestión y presente sus conclusio-

PLANETA	GRAVEDAD (M/S^2)	SALTO DE ALTURA (METROS)	LANZAMIENTO DE PESO		SALTO DE LONGITUD	
			DISTANCIA (METROS)	ANGULO OPTIMO (GRADOS)	DISTANCIA (METROS)	ANGULO OPTIMO (GRADOS)
LUNA	1,62	9,36	126,45	44,50	53,89	71,17
MERCURIO	3,70	4,66	56,46	43,99	23,60	71,17
VENUS	8,85	2,53	24,70	42,69	9,87	71,17
TIERRA	9,81	2,38	22,47	42,46	8,90	71,17
MARTE	3,72	4,61	56,17	43,89	23,47	71,17
JUPITER	26,39	1,51	9,43	39,01	3,31	71,17
SATURNO	11,67	2,16	19,17	42,02	7,48	71,17
URANO	11,48	2,18	19,46	42,07	7,61	71,17
NEPTUNO	11,97	2,13	18,74	41,95	7,29	71,17
PLUTON	1,96	7,91	104,86	44.45	44,54	71,17

Proezas olímpicas en otros mundos



El atleta salta con una velocidad inicial de 5,203 metros por segundo. En ese instante, su centro de masas está a la altura de un metro. ¿A qué altura saltará el atleta en otro planeta, suponiendo despreciable su resistencia y avance?

El atleta lanza el peso con una velocidad inicial de 14,2 metros por segundo. La bola abandona su mano a dos metros del suelo. ¿Con qué velocidad viajará la pesa en otros mundos, suponiendo despreciable la resistencia?

El atleta corre a 10 metros por segundo y salta entonces con el ángulo óptimo a una velocidad adicional de 4,076 metros por segundo. ¿A qué velocidad saltará en otro planeta, suponiendo despreciable la resistencia del aire?

nes en nuestra próxima reunión. En dicha subcomisión habrían de estar la Luna y Júpiter, evidentemente; propongo que figure también Venus en representación de los planetas de tamaño medio...”

“... así que, en mi opinión, podemos convenir en que el diámetro no influye de manera sensible en levantamiento de peso”, dijo Venus. Júpiter hizo un gesto de asentimiento. “Acordado por mayoría. Además, hemos convenido en que el factor principal es la gravedad, y que todas las masas han de ser multiplicadas por la aceleración gravitatoria local.”

“En eso consiste el peso”, quiso subrayar Júpiter. “En el producto de la masa por la gravedad. Si la gravedad fuese irrelevante, la halterofilia se llamaría levantamiento de masas.”

“Todo eso puede estar muy bien para el levantamiento con apoyo, pero yo sigo diciendo que no es así para la arrancada”, dijo Luna. “En este caso, el peso ha de ser alzado rápidamente; es más cuestión de impulso que de fuerza sostenida. Y el impulso es el cambio de cantidad de movimiento. La cantidad de movimiento depende de la masa, no del peso.”

“Haremos constar su desacuerdo en el informe definitivo”, manifestó Venus. “Pasemos ahora a las pruebas en pista.”

“La cuestión se vuelve muy compleja si se entra en demasiado detalle”, dijo Júpiter. “Depende de la andadura concreta de cada atleta. Lo más que podemos hacer es analizar un modelo plausible. Me parece que disponemos de una simplificación válida para todas las pruebas, excepto, quizás, las carreras de velocidad, que consiste en limitarnos a considerar la componente horizontal de la velocidad del atleta. Cuando el atleta corre, convierte energía química de su cuerpo en energía cinética, energía de movimiento; la componente que importa es la que impulsa al atleta hacia adelante. La energía química E que puede ser generada por un modelo humano estándar es la misma en todos los planetas miembros. Además, la energía cinética es $^1/_2mv^2$, siendo v la velocidad y m la masa. Por lo tanto, $E = {}^1/_2mv^2$, con lo que $v = \sqrt{2E/m}$, que es independiente de la fuerza de la gravedad. En breve, no es preciso realizar ajustes para las variaciones de gravedad en las carreras.”

“Quiero suponer que es así”, dijo Luna. “Pero en la carrera se produce también algo de movimiento en sentido vertical, en el cual sí influye la gravedad, pues no sólo interviene la energía cinética sino también la potencial. Y en cualquier caso, están ustedes despreciando la fase de aceleración inicial.”

“Razón por la cual he manifestado la necesidad de estudiar más cuidadosamente las carreras de velocidad. En lo atinente al movimiento vertical, estimo que han de ser los atletas quienes pongan a punto las técnicas precisas para minimizar su influencia.”

“Examinemos ahora el salto de altura”, dijo Venus.

“¡Que ciertamente depende de la gravedad!”

“Sí, Luna, estoy de acuerdo. En consecuencia, he preparado en una tabla los valores de la fuerza de gravedad en los diez planetas de la Federación.”

“La cosa es fácil”, dijo Júpiter. “Pensemos en un atleta de masa m. Si él...”

“O ella”, cortó Luna.

“Ellos pueden saltar verticalmente con velocidad inicial v, determinada por la fuerza impulsora desarrollada por sus músculos e independiente de la gravedad. Su energía cinética inicial vuelve a ser $^1/_2mv^2$. Si se elevan hasta una altura h lo que hacen es trocar su energía cinética en potencial, mgh, siendo g la aceleración de la gravedad. Así pues, $mgh = {}^1/_2mv^2$, y $h = v^2/2g$. Esta altura depende de g, obviamente. Cuanto mayor sea g, más bajo será el salto.”

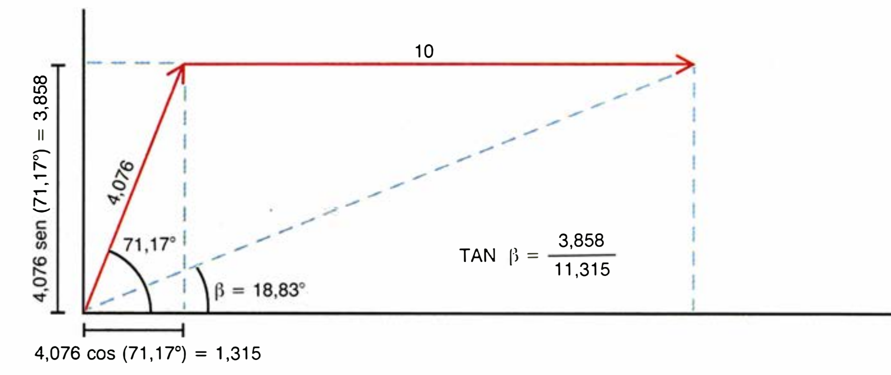
“¿Se me permite proponer una pequeña corrección?”, demandó Venus. “Lo que han calculado ustedes es la altura a la que puede elevarse el centro de masa del atleta. Pero parte de la técnica del salto de altura consiste en doblar el cuerpo de manera que el centro de masa se encuentre por debajo del listón. A título orientativo, sugiero que apliquemos una corrección de 0,2 metros, para tener en cuenta este hecho.”

“Han olvidado otra cosa más”, señaló Luna. “El centro de masa de los atletas no se eleva desde el nivel del suelo”.

“No; se encuentra a cosa de un metro sobre él.”

“Sí, pero antes de saltar hay que doblar las rodillas y ...

“Propongo”, dijo Júpiter, “que



EL ANGULO aparente de un salto largo difiere del seguido por el salto atlético. Sea un atleta que corre a 10 metros por segundo y salta luego elevándose con velocidad vertical a 4,076 metros por segundo con un ángulo de 71,17 grados. El salto añade 4,076 × cos (71,17) metros por segundo a la velocidad del deportista en dirección horizontal. El salto concede también al atleta una velocidad en dirección vertical, una componente igual a 4,076 × sen (71,17) metros por segundo. El ángulo aparente será, pues, de 18,83 grados, de acuerdo con lo arriba calculado.

apliquemos una corrección de 1 metro exactamente. En tal caso, la altura verdaderamente saltada será $h = 1 + v^2/2g$."

"¿Podemos esbozar algunas comparaciones basadas en la fórmula?", pidió Luna.

"Desde luego. Vamos a ver... en la Tierra, en 1988, justamente antes de la vigésimoquinta olimpiada, la marca olímpica de salto de altura quedó establecida en 2,38 metros por Genadiy Avdeyenko, de la Unión Soviética. Y la plusmarca femenina" —Júpiter echó una ojeada en dirección a Luna— "fue de 2,03, establecida por Louise Ritter, de los Estados Unidos", se apresuró a añadir. "Valiéndome de la fórmula, he calculado que la velocidad vertical inicial de Avdeyenko fue de 5,203 ms^{-1}, y la de Ritter, de 4,495 ms^{-1}. De haber realizado el mismo salto en la Luna hubieran alcanzado...hum... 9,36 y 7,24 metros, respectivamente. Y en Júpiter... solamente 1,51 metros y 1,38 metros."

"Quisiera ocuparme ahora del lanzamiento de peso", dijo Júpiter.

"Perfectamente. Veamos, es sabido que para maximizar la distancia alcanzada por el peso, éste debe ser lanzado en ángulo de 45°", dijo Venus. "Por esta causa, el análisis debería ser sencillo."

"Lo sería... si no fuese erróneo", dijo Luna. "La regla de los 45 grados solamente es válida para proyectiles lanzados desde el nivel del suelo, pero la bola se lanza desde la altura del hombro, y tal vez un poco más."

"¿No deberíamos considerar también el diámetro de la bola?"

"La verdad es que al caer se hunden en el suelo. De todas formas, es probable que nuestros errores sean ya mayores que eso. No, me parece que podemos modelizarlo como una masa puntual."

"Humm", dijo Venus. "Digamos que el peso es lanzado desde dos metros de altura sobre el suelo. Vamos a ver... Supongamos que sea lanzado formando un ángulo α con la horizontal, a velocidad v , desde una altura h sobre el suelo. La fórmula fundamental para los proyectiles $s = vt - {}^1/2gt^2$, donde s es la distancia recorrida, t es el tiempo, v es la velocidad inicial y g es la gravedad. Todo lo que hemos de hacer es considerar por separado los movimientos vertical y horizontal, fijándonos en que la gravedad actúa en sentido vertical..." Se produjo una larga pausa mientras trasteaba con el programa de álgebra simbólica de su ordenador de pulsera. "Bueno, vamos a ver... yo calculo que la distancia máxima viajada es

$$\frac{v}{g}\sqrt{v^2 + 2gh},$$

y que para conseguirlo, el ángulo tiene que verificar la ecuación

$$sen\ \alpha = \frac{v}{\sqrt{2(v^2 + gh)}}.\text{"}$$

Despreciada, claro está, la resistencia del aire. Y hemos decidido tomar $h = 2$. Ahora, la plusmarca olímpica masculina de 1988 fue de 22,47 metros, establecida por Ulf Timmerman, de la República Democrática de Alemania, y el récord femenino, de 22,41 metros, conseguido por Ilona Slupianek, del mismo país, en 1980. Voy a hacer solamente los cálculos para la prueba masculina, Luna; encárguese usted de las féminas. Suponiendo que la bola fuese lanzada con ángulo óptimo, Timmermann debió proyectarla con una velocidad inicial de 14,2 ms^{-1}. A esa velocidad, el ángulo óptimo es 42,46°, ligeramente menor que 45°. Un ángulo de elevación menor que 45° permite que el peso avance un poquito más en los dos últimos metros de su caída, pero hay que tener en cuenta la menor distancia recorrida antes de esa etapa final."

"¿Y qué sucedería en Júpiter?", inquirió el delegado joviano.

"Admitiendo el mismo valor de v, el ángulo óptimo hubiera sido 39,01 y la distancia, de tan sólo 9,43 metros. En la Luna, por el contrario, el ángulo hubiera sido 44,50, y el alcance, nada menos que 126,45 metros."

"¿Y qué corrección han pensado para tener el cuenta el efecto del diámetro planetario?", perseveró Luna tozudamente.

"La jabalina plantea una complicación adicional", prosiguió Júpiter. "El atleta está avanzando rápidamente al lanzar la jabalina, y le imparte así una velocidad extra."

"Y lo hace, además, desde bastante altura sobre el suelo", añadió Venus.

"Propongo que empecemos estudiando el salto de longitud", dijo Júpiter. "La verdad es que nosotros lo llamamos 'salto horizontal', porque en Júpiter su longitud no es mucha. El salto posee la velocidad horizontal necesaria, pero no el desplazamiento vertical."

"Como antes, se olvida usted de que el centro de masa del atleta no está al nivel del suelo," objetó Luna.

"No, porque estoy haciendo la aproximación de que cuando los pies del atleta tocan la arena, el centro de masa retorna a su primitiva altura."

"Júpiter tiene razón. Empecemos con un modelo sencillo, concediendo que el centro de masa del atleta es el mismo al concluir el salto que lo era al empezar. Supongamos que el atleta avanza a velocidad v al llegar a la línea de salto", dijo Venus. "Ejerce un impulso que le imparte una velocidad adicional u que forma un ángulo α con la horizontal. Calculo entonces que el ángulo α verifica

$$\cos\alpha = \frac{-v + \sqrt{v^2 + 8u^2}}{4u},$$

que curiosamente resulta independiente de la gravedad. La distancia máxima recorrida es

$$\frac{2u\ sen\ \alpha\ (v + u\cos\alpha)}{g},$$

que esta vez sí depende de la gravedad."

En 1988, el récord olímpico masculino de salto de longitud seguía siendo de 8,90 metros, conseguido por Bob Beamon, de los Estados Unidos, en los Juegos de México de 1968. La plusmarca femenina es 7,40 metros, establecida por Jackie Joyner-Kersee, del mismo país, en 1988. Suponiendo que Beamon se aproximase a la marca de salto a 10 ms^{-1} y que saltase en ángulo óptimo, su velocidad vertical inicial resulta ser 4,076 ms^{-1}.

"No es posible que los cálculos sean correctos. No da la impresión de que estén saltando a 71 grados", opuso Júpiter.

"Y es que no lo están."

"Pero si acaba usted de decir..."

"Son 71 grados con relación al atleta. Pero el atleta está avanzando a razón de 10 ms^{-1}. Para un espectador, el ángulo parecería ser 18,83. Los saltadores de longitud siguen trayectorias bastante tensas, porque casi todo su esfuerzo se aplica en el movimiento de progresión hacia delante."

"Veamos ahora la jabalina", propuso Venus. "Admitamos que el atleta está corriendo a velocidad v en el momento de lanzar la jabalina, y que ésta es proyectada con velocidad u a lo largo de una recta que forma ángulo α con la horizontal y desde una altura h. Despreciemos la resistencia del aire y el aerodinamismo de la jabalina. En tal caso, el ángulo óptimo... vaya, es complicado, no hay términos que se simplifiquen ni nada... ¡ah! Pasamos todo a cosenos... Ya está. Se reduce a una ecuación cúbica. Poniendo $y = \cos\alpha$ resulta

$$2uvy^3+(v^2+2u^2+2gh)y^2 - (u^2+2gh) = 0.$$

Podemos resolverla por métodos de aproximación numérica y hallar α después. Hecho esto se encuentra que el alcance de la jabalina será

$$\frac{(u+v\cos\alpha)(v+u\cos\alpha)}{g\,sen\,\alpha}\text{"}$$

En 1988 la plusmarca olímpica de jabalina quedó en 85,90 metros para hombres, establecida por Jan Zelezny de Checoeslovaquia, y la marca femenina, en 74,68 metros, por Petra Felke, de la República Democrática de Alemania. Suponiendo que Felke se estuviera moviendo a 10 ms^{-1} en el momento de lanzar la jabalina, que la arrojase en el ángulo óptimo y que saliera de su mano a 2 metros sobre el suelo, hallamos que su velocidad inicial debió ser $u = 20{,}046$ ms^{-1}.

Fijémonos en que ahora el ángulo óptimo es mayor que 45 grados, a diferencia del lanzamiento de peso. La razón es que con un ángulo más empinado permite que la jabalina permanezca más tiempo en el aire, por lo que la velocidad horizontal v puede actuar mayor período de tiempo. No obstante, hay que descontar la disminución en avance horizontal debida a que el lanzamiento se hizo con ángulo mayor de 45°. Además, lo mismo que en el salto de longitud, el verdadero ángulo con el que la jabalina inicia el vuelo no es α, a causa de la componente extra de velocidad horizontal v. En el caso de nuestro modelo del lanzamiento de Felke, el ángulo verdadero, visto por un juez, sería de 35,58°.

"Haciendo uso del voto de calidad de la Presidencia, he decidido aceptar el informe conjuntamente elaborado por Luna, Venus y Júpiter sobre la reglamentación normalizada de pruebas olímpicas." Hubo espontáneos aplausos y gran alivio general. "Con el fin de llevar a la práctica tal informe, propongo que para normalizar todas las marcas, éstas sean traducidas a los valores que hubieran alcanzado, de haber tenido lugar la prueba bajo los efectos de la gravitación terrestre... Sí, diga, Luna, ¿qué sucede?"

"Señor Presidente, deseo que conste en acta mi protesta contra el manifiesto terrestrialismo de esa moción."

"¿Desea la representante de la Luna formular alguna otra propuesta? Después de todo, la verdad es que los juegos olímpicos se originaron en la Tierra."

"Así es, en efecto. Propongo que tabulemos todas las plusmarcas en una hoja de cálculo de diez columnas, ajustadas a los diez valores de la gravitación local. De esta forma, las comparaciones resultarán más sencillas en el futuro."

El presidente alzó la cabeza, sorprendido. La verdad es que la idea era sensata. La moción fue aprobada a mano alzada.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE MECHANICS OF ATLETICS. Geoffrey Dyson. London, Hodder and Stoughton, 1977.

THE THEORY OF CLASSICAL DYNAMICS. J. B. Griffiths. Cambridge University Press, 1985.

A FIRST COURSE IN MECHANICS. Mary Lunn. Oxford University Press, 1991.

E. Rodríguez Ocaña, J. González León, Joandoménec Ros y Luis Alonso

Medicina española

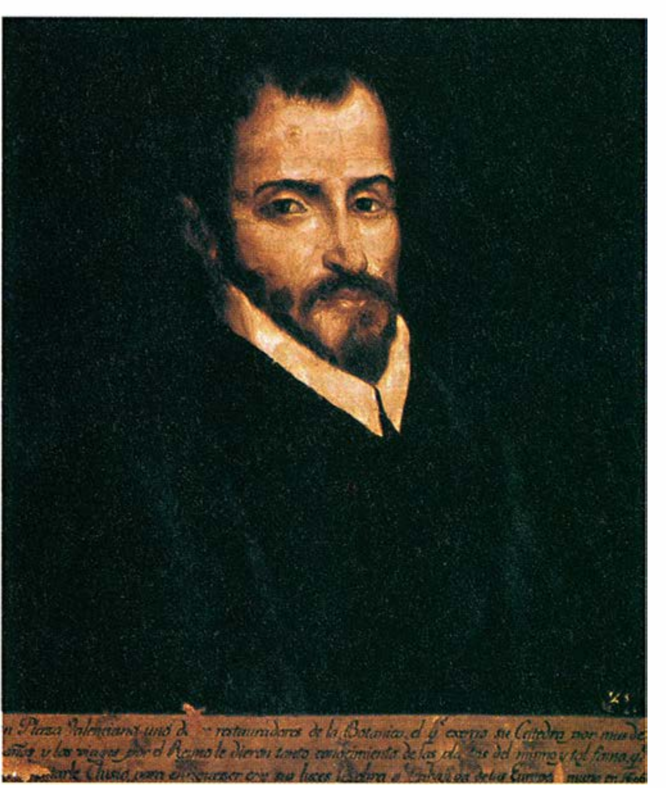
Clásicos del XVI

Clasicos medicos valencianos del siglo xvi, por José M. López Piñero. Conselleria de Sanitat i Consum; Valencia, 1990.

Hace tiempo que los historiadores de la medicina y de la ciencia han abandonado como tarea central la preocupación por el estudio de las "grandes figuras", reemplazándola por la consideración de procesos intelectuales que deben entenderse en íntima relación con su entorno cultural y social. José María López Piñero ha sido responsable, en buena medida, de la aclimatación entre nosotros de esta especie historiográfica, que ha mantenido con esfuerzo ejemplar en numerosos trabajos y en su práctica docente en la Facultad de Medicina de Valencia desde 1957.

Uno de los grandes temas de investigación por él atendidos es el de la ciencia moderna en España, al que ha dedicado varios libros, entre otras publicaciones. Su punto de partida, al desligarse de la estéril "polémica de la ciencia española", tenía características originales; frente al ensayismo apologético y al catastrofismo descalificador, puso su empeño en acumular las fuentes históricas de la ciencia española, vaciar las bibliotecas hispanas y europeas y examinar los textos recuperados con ayuda de todas las técnicas accesibles, desde el tradicional análisis de texto a las técnicas cuantitativas de corte bibliométrico. De ahí su importante contribución en forma de obra de referencia como, entre otras, la *Bibliografía histórica sobre la ciencia y la técnica en España* (1968, 1973) o el decisivo *Diccionario biográfico de la ciencia moderna en España* (1982), obras todas en colaboración, además de sus notables monografías (*La introducción de la ciencia moderna en España*, 1969; *Ciencia y técnica en la sociedad española de los siglos XVI y XVII*, 1979) y textos de síntesis. El trabajo de acumulación encuentra su cima más esmerada en la publicación de *Los impresos científicos españoles. Inventario, bibliometría y thesaurus*, cuyos diversos volúmenes cronológicos están en distinto estado de publicación.

Junto a estas aportaciones, López Piñero ha destacado por su afán de acercar los textos clásicos a los lectores de hoy, acometiendo una no menos constante política de edición de "clásicos", desde su primer librito, una *Antología de la escuela anatómica valenciana* (1962), al que hoy nos ocupa, pasando por *Clásicos españoles de la anatomía patológica anteriores a Cajal* (1979) y *Clásicos españoles de la anestesiología* (1981), entre otros, como la dirección de la Colección de Textos Clásicos españoles de Salud Pública, que auspicia el Ministerio de Sanidad. Esta línea de divulgación resulta ajena a toda chabacanería, puesto que está presidida por el afán de explicar; no sólo muestra, sino que explica, en calidad que identifica al historiador. Dentro de ella hay que inscribir el trabajo que comentamos, que une la preocupación por el mundo científico del Renacimiento con otro rasgo presente en el trabajo de este autor, su vinculación con el mundo valenciano.



Plaza, figura central del Renacimiento valenciano.

La Cátedra de Historia de la Medicina de la Facultad de Medicina de la Universidad de Valencia, primero, el Instituto de Estudios Históricos y Documentales sobre la Ciencia, después, han sido generadores de una atención sostenida por la historia de su entorno local, en absoluto ajena al rigor o a la crítica. Fruto de esta dedicación no han sido sólo las numerosas publicaciones que la jalonan, sino la perfecta integración en la comunidad de dicha institución educativa. El sostén en sus dependencias de un Museo histórico-médico, abierto con criterios interactivos en numerosas exposiciones, es un ejemplo; la continua relación con la Conselleria de Sanitat es otro no menos relevante.

Dentro del panorama científico del siglo XVI, los saberes relacionados con medicina ocuparon una posición preeminente, toda vez que constituían un cuerpo de doctrina con una antigüedad de siglos, que nutría una profesión universitaria, y del que surgieron las distintas ciencias de la vida. En el s. XVI, estos saberes conocieron tanto la mayor popularidad y extensión de sus fundamentos clásicos, de corte galénico, presentes en las dos principales corrientes, escolástica medieval y humanista renacentista, como el inicio de su descrédito, ante la aparición de criterios nuevos, algunos de proce-

dencia extraacadémica, los que, finalmente, supondrían la base de la medicina moderna.

Pues bien, el primer medio centenar de páginas del presente libro está ocupado por la descripción, en la exacta y limpia prosa de nuestro autor, del proceso de renovación (al cabo, frustrado como en el conjunto de los territorios hispánicos), que puede seguirse con particular claridad en el mundo médico valenciano de la época, privilegiado en el Renacimiento por su prolongado contacto con Italia. Luego de una presentación resumida de la cuestión, se estudia el contexto institucional de la ciencia médica valenciana, cifrado en su Universidad, para seguir con el análisis de los escritos de los autores de transición entre el s. XV y el XVI.

A partir de ahí se da cuenta de uno de los aspectos más destacados de la aportación médica valenciana, la introducción del movimiento vesaliano a través de Pedro Jimeno y Luis Collado, quienes extendieron la anatomía moderna a Salamanca y Alcalá más adelante, así como de otras contribuciones de interés, tanto de tipo humanista como de la corriente denominada "hipocratista", que concedía la primaría metodológica a la observación clínica. Cierra el siglo la presencia de dos elementos intelectualmente opuestos; de un lado, los protagonistas de un escolasticismo contrarreformista; del otro, portadores de ruptura a través de la nueva autoridad moderna, Paracelso, movimiento que en Valencia alcanzó la notoriedad de obtener una cátedra universitaria de medicamentos químicos, aunque su funcionamiento se limitara al curso 1591-92. Para finalizar, un repaso a la botánica médica y una referencia a la nueva concepción del "socorro de pobres" por su relación con la asistencia médica. (E. R. O.)

Fisiología animal

Adaptación

ADVANCES IN COMPARATIVE AND ENVIRONMENTAL PHYSIOLOGY. 9: VOLUME AND OSMOLALITY CONTROL IN ANIMAL CELLS, por R. Gilles, E. K. Hoffmann y L. Bolis. Springer-Verlag; Berlín, 1991.

Los seres vivos han desarrollado una amplia variedad de soluciones para resolver los problemas procedentes tanto del medio interno como del medio externo. Una comprensión clara de estas soluciones resulta de interés tanto para biólogos como para zoólogos o médicos y quizá pueda asimilarse de una forma más adecuada desde un enfoque comparado. Dicha aproximación requiere un conocimiento de las similitudes y diferencias entre las distintas formas animales, así como de las adaptaciones particulares de diferentes especies.

El tomo se centra en los mecanismos reguladores del volumen y osmolaridad en las células animales. Estos mecanismos se han conservado desde las formas más tempranas de vida bacteriana y constituyen características generales de las células de los vertebrados, a pesar de que la mayoría de los vertebrados terrestres no experimentan habitualmente variaciones apreciables en la osmolaridad de los líquidos corporales. Los sistemas de transporte implicados en la regulación de volumen se han estudiado mediante técnicas "in vitro", observando los efectos de las perturbaciones osmóticas del volumen celular. Sin embargo, los mecanismos de transporte no se activan "in vivo" por cambios de osmolaridad extracelular, sino por factores tales como el contenido de solutos osmóticamente activos u otros capaces de alterar la actividad de sistemas específicos de transporte iónico.

La regulación del volumen celular interviene en el crecimiento y proliferación celulares. Se ha demostrado, además, que muchas hormonas y factores de crecimiento también alteran los mecanismos de transporte iónico que participan en la regulación de volumen. El texto que comentamos ha conseguido compilar todos los conocimientos actuales respecto al papel de solutos inorgánicos y orgánicos en la regulación de volumen y osmolaridad de las células animales, así como profundizar en el estudio de adaptaciones específicas de ciertos órganos.

El libro se divide en ocho capítulos estructurados en dos partes: en la primera se estudia el papel de los iones inorgánicos en el control de volumen, mientras que la segunda se ocupa de los compuestos de tipo orgánico. A modo de introducción se presenta un capítulo sobre la regulación de volumen en los epitelios. Se inicia con un repaso de la organización general de los mismos y las propiedades de las membranas plasmáticas, para seguir con las concentraciones de solutos difusibles y no difusibles, las modificaciones en la permeabilidad acuosa y los efectos de los medios anisoosmóticos. Este capítulo se cierra con un apartado donde se resaltan aspectos aún sin resolver, tales como la existencia o no de mecanismos comunes en los diferentes tipos de células epiteliales, el papel exacto de la regulación de volumen en la integración y función celulares o los factores que inician las respuestas homeostáticas responsables de minimizar los cambios en la composición celular.

Los tres capítulos siguientes abordan los mecanismos específicos de regulación que se presentan en riñón y cerebro. El primero de ellos hace referencia a la regulación renal, aunque la discusión se centra de forma exclusiva en los segmentos tubulares de mamíferos, echándose en falta un tratamiento de mecanismos específicos de otros tipos de vertebrados e invertebrados. En el capítulo tercero se nos presenta un modelo de cuatro compartimentos para explicar la regulación del volumen cerebral y se pasa revista al papel que desempeñan en la misma hormonas como la atriopeptina. Aun cuando la regulación de volumen a nivel cerebral se puede correlacionar con el influjo y el eflujo de iones y compuestos orgánicos, no es menos importante establecer claramente de qué compartimentos celulares derivan estos compuestos. Se sabe que las alteraciones de la barrera hematoencefálica inducen un edema vasogénico en el que intervienen los astrocitos. Por tal razón, en el capítulo cuarto se discute el papel de los mismos tanto en situación normal como en condiciones patológicas.

El capítulo quinto va dirigido a la cuestión específica de los canales iónicos implicados en el control de volumen. En él se describen los incrementos y disminuciones reguladores de volumen a nivel de los linfocitos. Asimismo, se pone de manifiesto la dificultad en la identificación molecular de las vías que participan en estos procesos. La primera sección del libro se cierra con un capítulo en el que se estudian los mecanismos de activación de las respuestas reguladoras de volumen. Se deja clara constancia de que en ocasiones estos procesos se integran en la función global de los epitelios y que desempeñan un papel relevante en el crecimiento y proliferación celulares.

La segunda parte del texto versa sobre la incidencia de los compuestos orgánicos en la regulación de volumen. En el primero de sus capítulos se exponen las funciones de los solutos orgánicos de bajo peso molecular en las respuestas celulares. Se examinan el papel osmoprotector de los polialcoholes y metilaminas en las células renales y el papel destacado de los aminoácidos a nivel

cerebral. Asimismo, se consideran las respuestas de volumen en otros tipos celulares, tales como tumores ascíticos o miocitos cardíacos. El texto concluye con un capítulo en el que se pone de manifiesto la interacción preferencial de sales, azúcares y polialcoholes con las proteínas y la repercusión indirecta sobre las propiedades de estas últimas. (J. G. L.)

Ecología

Pilares

FOUNDATIONS OF ECOLOGY. CLASSIC PAPERS WITH COMMENTARIES. Dirigido por L. A. Real y J. H. Brown. The University of Chicago Press; Chicago, 1991.

Para Real y Brown, "un clásico es un artículo que ha hecho una contribución sustancial a nuestra manera de pensar sobre los procesos ecológicos", ya sea porque "plantea nuevos problemas, demuestra efectos importantes o estimula nuevas dimensiones para la investigación". Además, para ser considerado clásico debe haber transcurrido cierto tiempo entre la publicación y el momento en que la sociedad científica reconoce los méritos del artículo. Ello explica que la cuarentena de artículos recopilados en las más de 900 páginas del libro que nos ocupa se extienda entre 1887 (*El lago como microcosmos*, de S. A. Forbes) y 1974 (*Poblaciones biológicas con generaciones no superpuestas: puntos estables, ciclos estables y caos*, de R. M. May).

En el primer apartado, de los seis de que consta la obra, se agrupan los "Artículos fundacionales", que definieron la ecología como ciencia: Forbes (el citado), Cowles (vegetación de las dunas del lago Michigan), Clements (clímax), Gleason (asociaciones vegetales), Lindeman (el aspecto tróficodinámico) y otros.

En el segundo apartado, "Avances teóricos", se considera el papel de la teoría en el surgimiento de la ecología moderna; los artículos son de Preston (distribución de los individuos en especies), Hutchinson (el más citado discurso de clausura de ningún simposio científico, en el que estableció el concepto del nicho ecológico), Volterra (modelo depredador-presa), MacArthur y Pianka (uso de un ambiente heterogéneo), y otros.

El tercer apartado se dedica al debate ecológico, con el título "Tesis, antítesis y síntesis". Se pueden leer artículos de Tansley (uso y abuso de conceptos y términos en ecología vegetal), de nuevo Hutchinson (y su homenaje a Santa Rosalía: ¿por qué hay tantas clases de animales?), Schoener (estrategias tróficas), Ehrlich y Raven (coevolución de mariposas y plantas), y algún otro.

El cuarto bloque, de "Avances metodológicos", contiene lo que en su momento fueron nuevos enfoques y métodos en ecología: Leslie (y la matriz que lleva su nombre), Birch (tasa natural de aumento de una población de insectos), Holling (componentes de la depredación), Porter y Gates (equilibrios termodinámicos entre los animales y su ambiente) y Odum (estrategia del desarrollo del ecosistema), entre otros.

El quinto apartado se dedica a las

THE
AMERICAN NATURALIST

Vol. XCIII — May-June, 1959 — No. 870

HOMAGE TO SANTA ROSALIA
or
WHY ARE THERE SO MANY KINDS OF ANIMALS?*

G. E. HUTCHINSON

Department of Zoology, Yale University, New Haven, Connecticut

When you did me the honor of asking me to fill your presidential chair, I accepted perhaps without duly considering the duties of the president of a society, founded largely to further the study of evolution, at the close of the year that marks the centenary of Darwin and Wallace's initial presentation of the theory of natural selection. It seemed to me that most of the significant aspects of modern evolutionary theory have come either from geneticists, or from those heroic museum workers who suffering through years of neglect, were able to establish about 20 years ago what has come to be called the "new systematics." You had, however, chosen an ecologist as your president and one of that school at times supposed to study the environment without any relation to the organism.

A few months later I happened to be in Sicily. An early interest in zoogeography and in aquatic insects led me to attempt to collect near Palermo, certain species of water-bugs, of the genus Corixa, described a century ago by Fieber and supposed to occur in the region, but never fully reinvestigated. It is hard to find suitable localities in so highly cultivated a landscape as the Concha d'Oro. Fortunately, I was driven up Monte Pellegrino, the hill that rises to the west of the city, to admire the view. A little below the summit, a church with a simple baroque facade stands in front of a cave in the limestone of the hill. Here in the 16th century a stalactite encrusted skeleton associated with a cross and twelve beads was discovered. Of this skeleton nothing is certainly known save that it is that of Santa Rosalia, a saint of whom little is reliably reported save that she seems to have lived in the 12th century, that her skeleton was found in this cave, and that she has been the chief patroness of Palermo ever since. Other limestone caverns on Monte Pellegrino had yielded bones of extinct pleistocene Equus, and on the walls of one of the rock shelters at the bottom of the hill there are beautiful Gravettian engravings. Moreover, a small relic of the saint that I saw in the treasury of the Cathedral of Monreale has a venerable and

*Address of the President, American Society of Naturalists, delivered at the annual meeting, Washington, D. C., December 30, 1958.

Primera página del "Homenaje a Santa Rosalía".

lecciones que la naturaleza ha enseñado a los ecólogos: "Estudio de casos en los sistemas naturales". Es posible espigar entre sus artículos los de Teal (flujo energético en una marisma de Georgia), Watt (pauta y proceso en la comunidad vegetal), MacArthur (ecología de poblaciones de currucas americanas), Brooks y Dodson (depredación, tamaño corporal y composición del plancton), etc.

El último apartado, dedicado a las "Manipulaciones experimentales en sistemas de laboratorio y de campo", nos presenta los experimentos que han supuesto pruebas de la teoría ecológica. Aquí podemos releer los artículos de Kettlewell (melanismo industrial de los lepidópteros), Park (competencia interespecífica de los escarabajos de la harina), Huffaker (papel de los refugios en la depredación), Connell (competencia y otros factores que influyen en la distribución de las bellotas de mar), Paine (complejidad de las redes tróficas y la diversidad específica), Simberloff y Wilson (colonización de islas experimentales) y Bormann y Likens y su equipo (dinámica de nutrientes de la cuenca hidrográfica de Hubbard Brook).

Hay que agradecer a los compiladores que la selección se haya hecho según estos grandes apartados y no, como podría haber sido el caso, según los niveles de organización abarcados por los respectivos artículos (por ejemplo, poblaciones, comunidades, ecosistemas), o bien según otro esquema, igualmente válido e igualmente "clásico", que abordara primero los parámetros ambientales de interés en ecología, a continuación los aspectos autoecológicos, para pasar finalmente a los sinecológicos y biosféricos.

La selección de los artículos es más discutible. Como ocurre a menudo, no están todos los que son, aunque sí son todos los que están. Por ejemplo, los compiladores podrían haber retrocedido mucho más en el tiempo. Sin necesidad de remontarse a Teofrasto o Aristóteles, hay textos de Linné, Liebig, Malthus, Verhulst, Humboldt, Forbes (Edward), Moebius, Darwin y Lotka, entre otros muchos, que debieran figurar en una recopilación como ésta. Asimismo, hay toda una serie de artículos posteriores a 1974 que han entrado ya en la categoría de "clásicos" y podrían haberse incorporado sin dificultades ni temor a caer en la falta de perspectiva histórica. Una representación de textos sobre diversidad específica, estructura espacial y organización ecológica, producción nueva y reciclada, relaciones simbióticas, adaptación, estructura demográfica, bioquímica ecológica, espectros de biomasa, teoría de catástrofes y caos en ecología, por ejemplo, no sería sobrera.

Sin embargo, puesto que los compiladores y el comité editorial han establecido el segmento temporal indicado, no tiene objeto insistir en prolongarlo hacia atrás o hacia delante, entre otras cosas porque la extensión actual del libro lo hace ya bastante inmanejable. Me interesa, no obstante, señalar que hay vacíos evidentes incluso en el segmento escogido. Uno de ellos se refiere a que éstos son unos cimientos anglosajones, sobre todo americanos, de la ecología. Sin negar el papel que los ecólogos americanos han tenido en el desarrollo de la ecología moderna, limitar a Volterra y Von Post los autores europeos continentales seleccionados es injusto. Gause, Warming, Sukatchev, Braun-Blanquet, Margalef, Lieth, Budyko, Van der Maarel, entre otros ecólogos europeos "clásicos", merecerían tener su nicho ecológico en cualquier selección de los cimientos de la ciencia que, cada uno desde posiciones diversas, ha contribuido a hacer robusta y moderna.

Insisto en que la falta de espacio no puede ser la explicación, o al menos no la única. Tampoco es válida la afirmación tantas veces oída de que los científicos anglosajones no leen nada que no esté publicado en inglés, puesto que los autores citados publicaron en esta *lingua franca* la mayor parte de sus artículos "clásicos". Hay aquí, así lo entiendo, una cierta ignorancia a sabiendas, que traduce actitudes gremialistas, de clanes cerrados, poco recomendables en ciencia. Un único ejemplo será suficiente para entender lo que digo.

En 1968 la University of Chicago Press publicó *Perspectives in ecological theory*, de Ramon Margalef, que supuso un notable avance en la historia del pensamiento ecológico porque, seguramente por vez primera, ofrecía un marco conceptual coherente para una serie de fenómenos y procesos ecológicos que hasta entonces nadie había tratado de relacionar globalmente. Así se reconoció durante muchos años por parte de investigadores de todos los campos de la ecología. En 1989 la Princeton University Press publicaba una recopilación de veintitrés artículos sobre diversos campos de la ecología teórica, escritos por una treintena de autores y editado por tres ecólogos reconocidos. El título, al menos (*Perspectives in ecological theory*), invitaba a hacer algún comentario sobre su homónimo y predecesor. No se moleste el lector en buscarlo, ni en la introducción ni en las bibliografías de cada uno de los capítulos. (En sólo uno de ellos se cita, de pasada, un artículo reciente de Margalef.) Y, sin embargo, este libro no tiene el carácter seminal que en su día tuvo el de la Universidad de Chicago, traducido a varios idiomas (al español en 1978). El párrafo final del comentario que sobre el libro de los autores citados hizo Margalef en las páginas de esta misma revista en septiembre de 1990 no tiene desperdicio.

Volviendo ahora al objeto de mi comentario, una última consideración. Si bien es utilísimo disponer de ediciones facsímil de los artículos que supusieron en su momento un hito en la historia reciente de la ciencia ecológica, reducir la aportación de los autores seleccionados a un solo artículo (dos, todo lo más), es introducir un sesgo importante en nuestra interpretación de la obra de estos científicos. Aunque los artículos de Grinnell, Lindeman, Volterra y Huffaker, por ejemplo, condensan sus respectivas líneas de investigación, Park dedicó toda su vida al estudio de *Tribolium*, la obra ecológica de Hutchinson hay que buscarla en sus libros sobre limnología y ecología de poblaciones tanto como en los artículos científicos, y lo mismo puede decirse de Wilson, Odum, etc.

Por ello, quien quiera tener una visión global de la labor de los autores compilados habrá de pasar de la imagen congelada en el tiempo (la fotografía) que representan los artículos aquí contenidos a las películas que son las series de artículos de los propios autores, los libros de ecología o las síntesis (por ejemplo, de los *Annual Reviews of Ecology and Systematics*). Como instantánea histórica, sin embargo, estas fotografías en blanco y negro o que ya amarillean suponen un documento impagable. (J. R.)

Faraday

Químico

MICHAEL FARADAY AND THE ROYAL INSTITUTION, por John Meurig Thomas. Adam Hilger; Bristol, 1991.

EXPERIMENTAL RESEARCHES IN CHEMISTRY AND PHYSICS, de Michael Faraday. Taylor and Francis; Londres, 1991.

DU FLOU AU CLAIR? HISTOIRE DE L'AFFINITÉ CHIMIQUE, por Michelle

Goupil. Editions du Comité des Travaux historiques et scientifiques; París, 1991.

Por una vez no debemos dejar de lado las frases grandilocuentes, si hemos de servir a la verdad: Faraday es a la ciencia contemporánea lo que Newton fue a la mecánica clásica. Y adviértase la desmesura de lo comparado. Michael Faraday (1791-1867), con la introducción del concepto de campo y el descubrimiento de la inducción electromagnética consolida los cimientos de la física clásica y les da un sentido unitario último, al tiempo que liga a ésta con la química naciente a través, entre otras, de las leyes de la electrolisis.

Desde muy pronto, el alumno se familiariza con el farad, unidad de capacidad eléctrica que equivale a un coulomb partido por un volt. A medida que progresa va conociendo el "efecto Faraday" (el paso de la luz polarizada por cierto medio en la dirección de un campo magnético provoca la rotación del plano de polarización) y la "ley de la inducción electromagnética de Faraday" (un cambio en el flujo magnético de un circuito cerrado, producido por cualquier medio, genera una fuerza electromotriz en el circuito proporcional en cada instante a la velocidad de cambio del flujo). Y así, el alumno termina por pensar en un Faraday cerrado entre condensadores y galvanómetros.

Para hacernos una idea más cabal de la obra de Faraday, vale la pena detenerse en su aportación al progreso de la química. Con ese fin hemos seleccionado tres libros que nos sirvan de ayuda. En primer lugar, una biografía rigurosa y amena que nos sitúe al personaje en su tiempo y en su creación; en segundo lugar, los escritos de Faraday sobre el particular, y, por fin, una revisión reciente del concepto de afinidad que lo enmarque en la perspectiva del desarrollo general de la química.

John M. Thomas, director de la Institución Real y del laboratorio de investigación Davy-Faraday, vive y trabaja, desde hace tiempo, donde el último pasó cincuenta años. El mundo que nos pinta, con su protagonista, no sólo lo conoce como nadie, sino que le es muy querido. Por eso, *Michael Faraday and the Royal Institution* es un relato cálido, sin sombras. Lo que no merma su exactitud en la reconstrucción gradual del escenario y del drama. Lleva el marchamo de la entidad que preside y que no es otro que el de inculcar a los jóvenes el entusiasmo por la investigación y experimentación científicas. A imagen y semejanza de Faraday.

Hijo éste de un herrero humilde de Newington Butts, en los arrabales de Londres, hubo de abandonar la escuela a los doce años para empezar a trabajar el siguiente como chico de los recados y, al poco, encuadernador del librero que lo tenía contratado. Entre hilar y encolar, sacaba tiempo para ojear los cuadernillos. Dos obras, confiesa, deslumbraron al autodidacto: la tercera edición de la *Encyclopedia Britannica*, en particular el artículo sobre electricidad firmado por James Tytler, y las *Conversations on Chemistry*, de Mrs Marcet, que se hacían eco de las conferencias de Humphry Davy. Le ayudó a poner orden en su inquieta cabeza *Improvement of the Mind*, de Isaac Watts, cuyos consejos plasmó en una suerte de dietario donde anotaba cuanto leía, se le ocurría o experimentaba.

En 1812, un cliente del librero le ofrece la posibilidad de asistir a las últimas cuatro conferencias del curso que estaba dando el químico Davy en la Institución Real. Tal fue su celo y aprovechamiento que Davy lo puso de asistente a la primera oportunidad, el uno de marzo de 1813. Otro golpe de fortuna, ese mismo año, permite que le acompañe al continente, donde conocerá a Ampère, Gay-Lussac, Arago, Humboldt, Cuvier, Volta y Gustave y Auguste de la Rive. El trato social se mezcla con la preparación, por ejemplo, del triyoduro de nitrógeno, la combustión del diamante o el análisis de pigmentos antiguos.

El trabajo rutinario en el laboratorio porta la compensación, casi anual, de un nuevo hallazgo, que las biografías de Faraday, y también ésta, esquematizan en largos elencos clasificados por materias. Por señalar el de "física": 1821, rotaciones electromagnéticas; 1831, inducción electromagnética y vibraciones acústicas; 1832, identidad de la electricidad procedente de distintas fuentes; 1833; descomposición electrolítica; 1835, descargas eléctricas a través de los gases (física del plasma); 1836, electrostática; 1845, relaciones entre luz, electricidad y magnetismo (paramagnetismo y diamagnetismo); 1846, vibraciones de los rayos; 1849, gravedad y electricidad; 1857, tiempo y magnetismo; 1862, líneas de fuerza y concepto de campo. Thomas expone el alcance real de cada innovación y prefiere apoyarse en un testimonio posterior para enjuiciar su importancia histórica (Rutherford, Einstein, etcétera).

Poseía Faraday el raro instinto de definir el núcleo del problema a resolver, elección del equipo o su diseño y realización material si era necesario, tenacidad y otra escasa virtud en nuestro medio investigador, la de su afán por no dejar ningún cabo suelto.

Buscaba, más allá del ensayo, la unidad subyacente a todas las fuerzas de la naturaleza. En ello, convienen todos, tuvo que ver el sentido religioso y providencialista de su vida, que le inducía, por otro lado, a mostrarse duro y escéptico con los fenómenos paranormales y otras embaucaciones, a buscar siempre la verdad en la naturaleza: "El científico debe estar pronto a escuchar todas las sugerencias, y determinado a enjuiciar por sí mismo. No debe engañarse con las apariencias, ni tener hipótesis preferidas, ni pertenecer a ninguna escuela, ni obedecer maestro de ninguna doctrina. No debe doblegarse ante nadie, sino ante las cosas. La verdad ha de ser su objetivo principal. Si a eso añade industriosa habilidad, podrá confiar en correr el velo del templo de la naturaleza."

J. M. Thomas pone también prólogo a la reimpresión de las *Experimental Researches in Chemistry and Physics*, publicadas originalmente en 1859. Se trata de la compilación de los artículos que Faraday había dado a la imprenta desde 1816 hasta octubre de 1858 sobre ambas disciplinas, aunque preferentemente sobre química, aparecidos en el *Quarterly Journal of Science, Philosophical Transactions of the Royal Society, Philosophical Magazine* y otros. Se limita a corregir las erratas y a incorporar unas sustanciosas notas autobiográficas del máximo interés. Así, comenta a propósito de su primer artículo cómo su miedo superaba su confianza y, ambos, sus conocimientos "en unos años en que ni soñaba escribir algún día algo original en ciencia".

De la mano de Davy se inició en la química analítica. Sus primeros escritos combinan los trabajos sobre metalografía con los dedicados a la determinación de la pureza y composición de arcillas, limos y distintos gases, líquidos y sólidos. El método de determinación le conduce al descubrimiento de nuevas moléculas, como la del benceno ("bicarbureto de hidrógeno"). Varios artículos están consagrados a la condensación y licuefacción de los gases. En la década de los treinta aparecen sus escritos sobre electrolisis, y en la siguiente los de magneto-química y magneto-óptica.

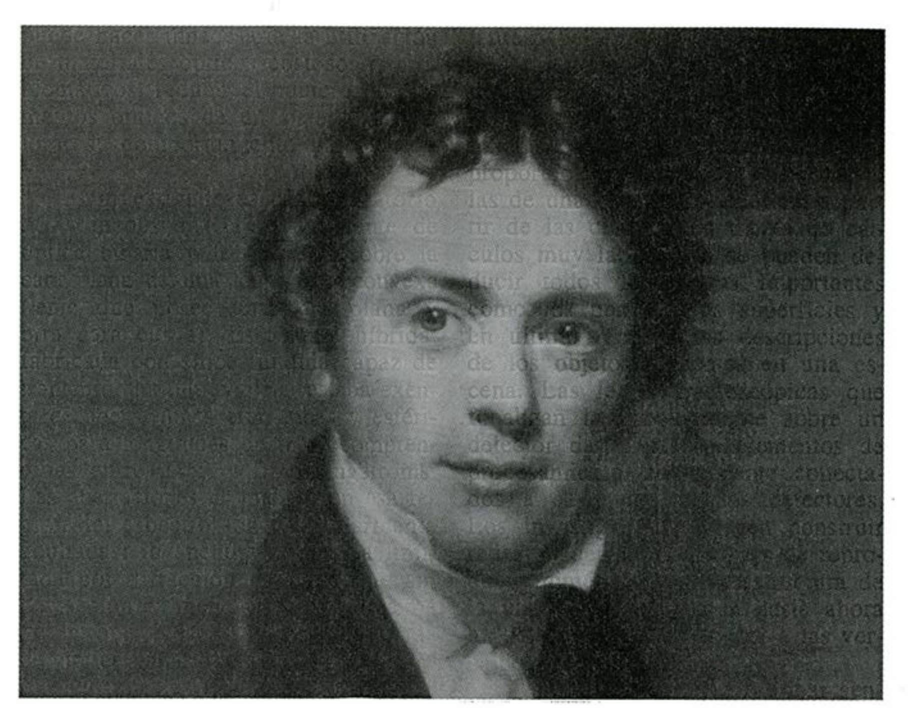
Ante el talante adanista que ha venido caracterizando a la juventud investigadora, puesto hoy en entredi-

cho, reviste la máxima actualidad esta gavilla de artículos de Faraday. Sabido es que los adolescentes japoneses han tenido durante generaciones, y siguen manteniendo, por lectura estival recomendada su *The Chemical History of a Candle*. Varios escritos del compendio podrían aconsejarse también a los nuestros: "Sobre el vapor de mercurio a temperatura ambiente" y "Aparato para la combustión del diamante", por ejemplo.

La influencia de Faraday llega, vía manuales franceses, muy pronto a España, si bien confundido en un principio con Davy (o Dawi, que escribe Antonio Casares, uno de nuestros químicos relevantes del segundo tercio del siglo pasado). Lino Peñuelas, en su *Tratado elemental de química analítica* (1867), primera obra hispana sobre la materia, le concede ya la importancia debida.

Michelle Goupil, en su *Du flou au clair?*, coloca a Faraday en el repunte postrero de la química newtoniana, entre quienes, como Ampère, Davy y Oersted, buscaban una unidad última de las fuerzas químicas, responsables de las afinidades, de las fuerzas eléctricas, magnéticas y la gravitación. Señala, en particular, las dos leyes cuantitativas de la electrolisis: primera, la cantidad de productos desprendidos en el cátodo es proporcional a la cantidad de electricidad que atraviesa el circuito (pesos medidos en una balanza y corriente en un electrómetro), y segunda, una misma cantidad de electricidad libera igual cuantía de productos químicamente equivalentes.

La historia de la química que, desde la óptica de la afinidad, divide la autora en cuatro partes, arranca de Cardano para arribar a Prigogine y la termodinámica de los procesos irreversibles por éste desarrollada. Precede un estudio preliminar de rápida inquisición por los diccionarios de los últimos tres siglos. (Si hubiera manejado ediciones anteriores del Calepino hubiera encontrado la misma definición de "afín", es decir, dícese de aquello que es limítrofe y aplícase también a los ligados por consanguinidad. Esta segunda acepción le hubiera permitido entender por qué hasta el siglo XVIII designa lo que es de naturaleza semejante.) Se detiene obviamente en los vocabularios franceses, prolongando el análisis a los términos que, en el dominio de la química, se le van asociando, verbigracia, simpatía, apetencia, familiaridad, alianza. Completa ese cuadro con el campo semántico actual, el de una magnitud termodinámica mensurable.



Michael Faraday (1791-1867).

La protohistoria de la noción se convierte en un repaso por las principales corrientes filosófico-naturales del nacimiento de la ciencia moderna (metalúrgicos, iatroquímicos y "metafísicos"). Pero prefiere la exposición de los representantes más significativos; en un comienzo, Fracastoro (de quien omite la noción de contagio, y por ende no le saca partido), De la Porta, Cardano, Van Helmont, etcétera. Sigue el análisis de dos sistemas "afines" en la explicación de la combinación química, a saber, el mecanicismo cartesiano, con Lémery, y la teoría corpuscular de Gassendi, con Boyle. (Los químicos españoles, catalanes sobre todo, dependieron en buena parte de Lémery, cuyo *Cours de Chymie* gozó de amplia difusión.) Remata el cuadro con el Newton químico y su concepto central de *selectividad de la reacción química*, generalizando la fuerza de la gravedad a las interacciones entre las partículas interaccionantes.

La parte tercera, la más extensa, cubre el siglo XVIII y principios del XIX y refleja la aplicación y desarrollo del programa newtoniano. Son los años del magisterio de Stahl, en que la química se centra en las reacciones de combustión-calcinación y reducción con la ayuda del flogisto. Las variaciones poseen aquí un carácter marcadamente geográfico: círculo británico de Keill y Freind; círculo holandés de Boerhaave, Gravesande y Musschebroek, y círculo francés del entorno de la Enciclopedia. La reacción antinewtoniana, francesa, merece todo un capítulo. Pero ese chauvinismo queda compensado con el inmediatamente dedicado a las tablas de afinidades, repleta de signos alquimistas pero de significación estrictamente química ya. En esas páginas y en las dedicadas a la renovación lavoisierana encontrará el lector lo mejor del libro.

La matematización completa, es decir, el asentamiento pleno de la química en los raíles de la mensuración, incluida esa noción tan evanescente y antropomorfa como es la de afinidad, son el objeto de la cuarta y última parte. Ha entrado la química en el herraje de la termodinámica, lo que supone la axiomatización de sus funciones. El nuevo lenguaje habla de la equivalencia de calor y trabajo y las reacciones han de atenerse al principio de conservación de la energía, con la definición precisa de la variación de la energía (U), la de entalpía libre (H), la energía libre (G) y demás que el lector supone. Primero, en el caso de las reacciones reversibles y, por último, en las que el tiempo marca una dirección.

Una obra de tal ambición deja, casi ineludiblemente, muchos vacíos. Aparte de alguno señalado, mucho tuvo que ver la botánica (en la asimilación de los nutrientes) y la zoología (en el metabolismo) en los problemas, si no en las soluciones, que la afinidad planteaba. Por último, el galocentrismo silencia la obra hoy recuperada de Stanislao Cannizaro, uno de los téoricos de la química decimonónica más vigorosos. (L. A.)

Apuntes

El estudio de las variaciones del nivel del mar a lo largo del último período interglacial revela dos cosas reseñables: una amplia oscilación geográfica y un intervalo de calentamiento que se extendería a lo largo de 15.000 años. Y por lo que concierne al debate planteado sobre el cambio climático global, parece que la capa helada del Antártico occidental permanecería estable aun cuando subiera la temperatura.

La frontera de la ciencia se halla, muchísimas veces, en la capacidad de la técnica. ¿Puede o no puede el hidrógeno ser metálico? Este elemento es monovalente, como lo es también el sodio. No hay razón, pues, para que, transformado en sólido —mediante presión— , se convierta en metálico. Hace tres años, dos investigadores afirmaron que habían obtenido ese estado de la materia. Pero se les cuestionó porque los resultados podrían haber sido confundidos por las señales procedentes del aparato. Aquéllos han vuelto a la carga y defienden que los indicadores de metalización (reflectancia óptica reforzada) se mantienen persistentes. Pero como se trabaja en los confines de la capacidad de la técnica son muchos los que no han cambiado su rictus de escepticismo.

Algunos fósiles vivientes parecen decididos a emitir un dulce canto de cisne antes de extinguirse. Así, la cacerola de las Molucas *Limulus polyphemus*. De su sangre se extrae lisato amebocítico (LA), compuesto químico que sirve para someter a prueba las toxinas bacterianas. Lo emplean los laboratorios farmacéuticos para demostrar el grado de seguridad de sus drogas inyectables y de los dispositivos que entran en contacto directo con el torrente circulatorio, como válvulas cardiacas y catéteres. Esos xifosuros se dejan sangrar y vuelven a su medio marino para recuperarse. Puesto que, de cada 20 ml de sangre se obtienen 5 ml de LA y vale cada dosis de reactivo 2500 pesetas, la economía hindú piensa en esas cazoletas para recoger los ingresos que sufraguen todas las inversiones en investigación científica.

Los partos estelares son gemelares. A esa conclusión se ha llegado en un congreso reciente de astrofísicos dedicado a los sistemas binarios. Se dan éstos sobre todo en las fases tempranas de la evolución de las estrellas. Y acotando más: predominan en la primera mitad de la fase de secuencia principal. Si se lleva la tesis a su exigencia de universalidad, habrá que buscarle a nuestro Sol la compañera que ha perdido.

Para avanzar, lo sabía Sócrates, hay que poner en cuestión lo recibido. Uno de los argumentos en que se basa la hipótesis del impacto meteorítico para explicar el límite entre el Cretácico y el Terciario es la presencia, en cantidades apreciables, de dos aminoácidos no proteínicos: ácido a-aminoisobutírico e isovalina racémica, aminoácidos abióticos que serían destruidos por el vulcanismo que postula la tesis antípoda. La aporía se soluciona, esgrimen ahora otros, si esos aminoácidos de la discordia nacen de la gasificación del carbono. Para corroborarlo han aislado e identificado por cromatografía de gases y espectrometría de masas grandes cantidades de precursores aminoacídicos (hidantoínas) en un condensado hídrico por gasificación.

La difteria constituyó durante siglos una de las causas principales de mortalidad infantil hasta que se generalizó la vacuna en las postrimerías de los años veinte. La lucha contra la misma no se ha detenido. Conocida mejor, se ha logrado su cristalización, que nos evidencia su naturaleza: posee una estructura modular con tres dominios, que corresponden al catalítico, al de unión con el receptor y al de las funciones de translocación de membrana. Semejante disposición arquitectónica permite tomarla como ejemplo para crear proteínas quiméricas, inmunotoxinas por ejemplo, en las que el dominio de unión con el receptor sea substituido por anticuerpos con fines citolíticos.

Las cuestiones que a todos afectan deben decidirse entre todos. Así pensó el pueblo suizo a propósito de la regulación de las técnicas de bioingeniería y reproducción asistida. Por contrarios a la dignidad de la persona humana han reprobado, en plebiscito reciente, el recurso a las madres de alquiler, manipulación de embriones para la determinación del sexo y la introducción de material hereditario no humano en el genoma del hombre.

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



PRIMEROS RESULTADOS DEL TELESCOPIO ESPACIAL HUBBLE, por Eric J. Chaisson
A pesar de sufrir defectos ópticos y mecánicos, el Hubble ha transmitido un río de imágenes espectaculares, que nos muestran tormentas en Saturno y posibles agujeros negros.

LIPOPROTEINA(a) EN LA ENFERMEDAD CARDIACA, por Richard M. Lawn
Una curiosa proteína, transportadora de colesterol y con afinidad de unión por los coágulos de sangre, redobla el peligro de ataque cardiaco.

CONTROL DE LA RABIA EN LA NATURALEZA, por William G. Winkler y Konrad Bögel
Europa y Norteamérica están acometiendo un proyecto de investigación experimental para confirmar un protocolo preventivo que nació en un laboratorio de Atlanta, hace treinta años.

EL CODICE MENDOZA, por Patricia Rieff Anawalt y Frances F. Berdan
Este magnífico libro pictórico, compilado por los aztecas a instancia de los conquistadores españoles, constituye un testimonio visual de una civilización que desaparecería rápidamente.

EL GALEON ESPAÑOL, por F. Fernández González
La riqueza de la tecnología de las naves españolas se resume en los galeones que fueron la guardia de la Carrera de las Indias y de las armadas en Europa.

ELECTRONICA INDIVIDUAL, por Konstantin K. Likharev y Tord Claeson
¿Es la corriente eléctrica un movimiento de electrones individuales o un flujo continuo de un fluido de cargas? Los experimentos recientes ponen de manifiesto la veracidad de ambas hipótesis.

CULTIVOS TRANSGENICOS, por Charles S. Gasser y Robert T. Fraley
La biotecnología ha creado plantas dotadas de resistencia contra las plagas y frutos que tardan en degradarse. Resultan, además, inocuos para el ambiente e idóneos para el comercio.

CONTABILIDAD DE LOS BIENES AMBIENTALES, por Robert Repetto
Un país puede talar sus bosques, erosionar sus suelos, contaminar sus acuíferos, cazar sus animales salvajes y explotar sus pesquerías hasta la extinción, pero sus ingresos calculados no se ven afectados cuando estos bienes desaparecen.

